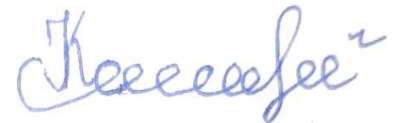


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Кос Оксана Игоревна

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СОСТОЯНИЕМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 2.3.8
«Информатика и информационные процессы (технические науки)»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

к. т. н., доцент

Смирнов Владимир Юрьевич

Москва – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....	13
1.1 Термины и определения в области надежности в соответствии с нормативными документами.....	13
1.2 Способы оценки надежности сложных технических систем.....	15
1.2.1 Детерминированные способы оценки надежности.....	15
1.2.2 Методы расчета по предельным состояниям.....	17
1.2.3 Вероятностные методы.....	20
2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	25
2.1 Общий подход к управлению техническим состоянием сложной технической системы.....	25
2.2 Расчет фактического технического состояния сложных технических систем.....	29
2.2.1 Исходные данные для методов управления техническим состоянием СТС	29
2.2.2 Расчет и прогнозирование надежности сложных технических систем	31
2.2.3 Метод расчета параметров функций отказов СТС	35
2.3 Рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС.....	36
2.3.1 Выбор метода расчета надежности сложных технических систем.....	36
2.3.2 Классификация элементов сложной технической системы.....	39
2.3.3 Учет взаимосвязи элементов сложной технической системы в рекуррентном методе.....	44
2.3.4 Постановка задачи расчета надежности на основе классификации элементов СТС	46
2.3.5 Построение рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов сложной технической системы.....	47

2.4	Математический метод управления техническим состоянием элементов сложной технической системы на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.....	50
2.4.1	Постановка задачи управления техническим состоянием элементов сложной технической системы на основе выбранных функций отказов элементов	50
2.4.2	Математический метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами для вычисления оптимального интервала замены (ремонта) каждого элемента	53
2.5	Анализ различных численных методов решения интегро-дифференциальных уравнений математического метода вычисления вероятности безотказной работы сложной технической системы	64
2.6	Схема управления техническим состоянием сложной технической системы.....	70
2.7	Расчет показателей технического состояния сложной технической системы и их прогнозирование.....	76
2.8	Прогнозирование износа металлических пролетных строений железнодорожных мостов	85
3	ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИРОВАННОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ	89
3.1	Применение адаптированного генетического алгоритма	89
3.2	Выбор метода оптимизации.....	90
3.3	Постановка задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект	92
3.4	Краткий обзор и анализ генетических алгоритмов.....	96
3.5	Решение задачи оптимизации замен (ремонтов) элементов.....	112
4	АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	117
4.1	Рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС	117

4.2	Алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы	122
4.3	Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием модифицированного генетического алгоритма	125
4.4	Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации	127
5 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....		130
5.1	Схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации	131
5.2	Интерактивный графический препроцессор для формирования графической моделей СТС	133
5.3	Модуль программного комплекса расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности и классификации элементов СТС.....	137
5.4	Модуль программного комплекса расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.....	137
5.5	Модуль программного комплекса расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.....	138
5.6	Преимущества программного комплекса расчета надежности СТС.....	139

6 АДАПТАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ.....	141
6.1 Технология применения разработанных алгоритмов на высокопроизводительной параллельной вычислительной системе.....	141
6.2 Сравнение времени выполнения расчетов на однопроцессорном компьютере и высокопроизводительном параллельном компьютере	144
7 СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ СТС.....	148
7.1 Расчет параметров функций отказов элемента СТС с учетом ранее проведенных ремонтов и обследований	148
7.2 Расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС	149
7.3 Расчеты срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности с учетом созданной классификации элементов	150
7.4 Схема управления техническим состоянием моста, пропускающего реку «Нерусса», расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути	153
7.5 Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста.....	156
7.6 Расчеты меры повреждения и вероятности безотказной работы для поездов I, II, III типов	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

В нашей стране эксплуатируется огромное количество сложных технических систем (СТС). Для того, чтобы снизить затраты на эксплуатацию и, одновременно, обеспечить заданный уровень надежности, необходимо применение вероятностных методов и алгоритмов при принятии управленческих решений. Это позволит управлять техническим состоянием СТС таким образом, чтобы гибко реагировать на изменение эксплуатационных условий, обеспечивать экономический эффект и безопасность эксплуатации. Следовательно, задача разработки вероятностных методов и алгоритмов управления техническим состоянием СТС, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Существенный вклад в построение теории надежности СТС внесли ученые: А.В. Александров, Е.Ю. Барзилович, К.Б. Бобылев, С.А. Бокарев, В.В. Болотин, К.П. Большаков, В.М. Бродский, Е.С. Вентцель, В.М. Горпенченко, Б.В. Гнеденко, Л.И. Иосилевский, П.С. Костяев, В.М. Круглов, Е.Н. Курбацкий, В.В. Ларионов, А.С. Лычев, В.П. Мальцев, Н.А. Махутов, В.Б. Мещеряков, Е.М. Морозов, Н.И. Новожилова, А.В. Носарев, В.О. Осипов, И.В. Павлов, А.С. Платонов, А.А. Потапкин, В.Д. Потапов, В.Д. Райзер, А.Р. Ржаницын, И.А. Рябина, П.М. Соломахин, А.С. Стрелецкий, С.А. Тимашев, И.А. Ушаков, Е.П. Феоктистова, А.А. Цернант, В.П. Чирков и другие.

Большой вклад в развитие генетических алгоритмов внесли исследователи: J.R. Koza, W.B. Langdon, N.F. McPhee, R. Poli, Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, Т.В. Панченко, М.Н. Пилиньский, Д.В. Рутковская, Л.А. Рутковский [1-4] и другие.

Рекуррентный алгоритм расчета надежности структурно-сложных систем, описанный в монографии И.А. Рябина [5], послужил основой для построения рекуррентного метода расчета надежности с использованием классификации элементов СТС.

Математические методы теории обслуживания сложных систем по состоянию и теории надежности и эффективности в технике, описанные в монографиях Е.Ю. Барзиловича [6-9], послужили основой для построения метода управления техническим состоянием элементов СТС с использованием выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Цель работы: разработка вероятностных методов и алгоритмов управления техническим состоянием СТС для снижения затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

Задачи диссертационного исследования:

– выбрать закон распределения и разработать метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;

– создать классификацию элементов СТС по критерию их влияния на техническое состояние всей СТС в целом;

– построить рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех предшествующих замен (ремонтов);

– построить метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента.

– разработать алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;

– создать программный комплекс расчета надежности СТС на основе разработанных алгоритмов;

– построить схему управления техническим состоянием элементов СТС и системы в целом на весь период эксплуатации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- разработан метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;
- создана классификация элементов СТС по их влиянию на надежность системы в целом;
- разработан рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени;
- создан метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) каждого элемента СТС;
- применен адаптированный генетический алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;
- построена схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации.

Теоретическая значимость работы:

- разработанный метод позволяет определять параметры функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;
- произведена классификация элементов СТС по степени взаимосвязи и взаимовлияния элементов СТС и их влияния на показатели надежности СТС в целом;
- создан рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС;
- построен метод управления техническим состоянием элемента СТС на весь период эксплуатации;
- использован генетический алгоритм для решения задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию СТС при условии обеспечения заданной надежности;

- созданный программный комплекс позволяет рассчитывать показатели надежности СТС и прогнозировать изменение этих показателей в процессе последующей эксплуатации;
- разработана схема управления техническим состоянием элементов СТС и систем в целом на весь период эксплуатации.

Практическая значимость работы:

- с применением разработанного метода произведены расчеты параметров функций отказов для различных элементов СТС на основании результатов обследования;
- в разработанном программном комплексе произведены расчеты вероятности безотказной работы для ряда СТС с учетом произведенной классификации элементов;
- произведены расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) для различных элементов ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС с учетом ранее проведенных ремонтов и обследований;
- расчеты с помощью разработанного модуля программного комплекса на основе генетического алгоритма позволяют достичь оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;
- использование созданного программного комплекса позволяет принимать научно-обоснованные решения по управлению СТС на основе стратегии их эксплуатации по фактическому техническому состоянию с учетом проведенных обследований, плановых и внеплановых ремонтов, а также внезапных отказов;
- построены схемы управления техническим состоянием для ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС на весь период эксплуатации.

Методология и методы исследования.

В диссертационном исследовании использованы известные, достоверные и хорошо зарекомендовавшие себя на практике математические методы и алгоритмы: вероятностные методы, методы решения интегро-дифференциальных уравнений, численные методы, методы поиска экстремумов, рекуррентные методы, генетический алгоритм и др.

Положения, выносимые на защиту (в соответствии с пунктами 1, 6, 8, 16 области исследований паспорта специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»):

- классификация элементов СТС по их влиянию на надежность системы в целом;
- рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС;
- метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами;
- применение генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;
- схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается следующим:

- достоверностью примененных математических методов исследования, в том числе методов теории вероятности и математической статистики;
- согласованностью результатов расчетов, полученных в разработанном программном комплексе, с данными, полученными в ходе обследований СТС;
- публикациями результатов исследований в рецензируемых научных изданиях, в том числе рекомендованных ВАК;
- докладами и обсуждениями результатов исследований на российских и международных конференциях
- воспроизводимостью результатов исследований
- результатами практического применения.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- XIII научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (Москва, МИИТ, 2012);

- Международная научная конференция «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность» (Москва, НИИСФ РААСН, 2013);
- XIV научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (Москва, МИИТ, 2013);
- X международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem» (Москва, МИИТ, 2014);
- Международная научно-практическая конференция «Транспорт-2014» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2014);
- 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), (St. Petersburg, 2017);
- 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), (St. Petersburg, 2018);
- 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 20-24 ноября 2023 года;
- Международная научно-практическая конференция, посвящённая 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, (Гомель, 16–17 ноября 2023 г.);
- Международная Воронежская весенняя математическая школа «Современные методы теории краевых задач. Понтрягинские чтения - XXXV» – 2024 (Воронеж, 26 – 30 апреля 2024 г.).

Публикации. По тематике работы опубликовано 17 научных работ [10-26]. В изданиях ВАК РФ и в изданиях, включенных в международную реферативную базу данных Scopus опубликованы девять работ [10 - 18].

Личный вклад. Работы диссертанта, выполненные с соавторами. В основных работах [10–18] приведены ключевые положения диссертации. Работы [10, 16, 17] посвящены созданному автором методу управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющему вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента и разработке

модуля программного комплекса на его основе. В работе [11] приведены результаты произведенных автором расчетов показателей технического состояния искусственных сооружений и их прогнозирование. Работа [15] посвящена применению модифицированного автором генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. В работе [18] представлена произведенная автором адаптация программного комплекса для распределенных вычислительных систем. Результаты в работах [12, 13, 14] получены диссертантом лично при научном руководстве к.т.н. В.Ю. Смирнов. В работе [12] представлен разработанный автором метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований. Работа [13] посвящена созданному автором рекуррентному методу расчета надежности на основе классификации элементов СТС и прогнозированию вероятности ее безотказной работы. В работе [14] приведена разработанная автором схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации. Работы [19 – 26] являются статьями в сборниках научных конференций или тезисами научных докладов, выполненных автором на различных научных мероприятиях, в том числе международных конференциях. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованных работах. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные результаты получены лично автором.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объем диссертации 184 страниц текста, включая 42 рисунка, 4 таблицы. Список литературы содержит 83 наименования.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

1.1 Термины и определения в области надежности в соответствии с нормативными документами

Решение задачи управления техническим состоянием СТС, таких как искусственные сооружения, требует использования терминов и определений в области надежности, соответствующих нормативным документам.

Основные термины и определения надежности регламентируются нормативными документами: ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования», являющийся национальным стандартом Российской Федерации» [27], и ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения», являющийся межгосударственным стандартом [28].

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [28].

Надежность строительного объекта – способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации [27].

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение срока эксплуатации [28].

Долговечность – способность строительного объекта сохранять физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы при надлежащем техническом обслуживании [28].

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта [28].

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования [28].

Срок службы – продолжительность нормальной эксплуатации строительного объекта до состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна [28].

Расчетный срок службы – установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции [27].

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует нормативным требованиям [28].

Отказ – событие, влекущее за собой потерю работоспособности объекта [28].

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданного срока службы отказы конструкций не возникнут [28].

На основе приведенных выше гостированных терминов и определений можно сформулировать дополнительные определения, которые необходимы в процессе исследований надежности искусственных сооружений.

Отказ элемента конструкции искусственного сооружения – это выход хотя бы одного из параметров надежности этого элемента за допустимые пределы.

Структурная надежность – вероятность безотказной работы системы, рассчитанная по структурной схеме надежности и статистическим параметрам.

1.2 Способы оценки надежности сложных технических систем

Существуют различные способы оценки надежности СТС [29 - 49], такой как искусственное сооружение на железных дорогах:

- детерминированные способы оценки надежности;
- способы оценки надежности с помощью методов расчета по предельным состояниям;
- вероятностные способы оценки надежности.

Рассмотрим их более подробно.

1.2.1 Детерминированные способы оценки надежности

К детерминированным способам относятся способы оценки надежности с использованием методов расчета по допускаемым напряжениям и по разрушающим усилиям.

Способ оценки надежности мостов с использованием метода расчета **по допускаемым напряжениям** применялся до 1955 года.

Расчет на прочность по допускаемым напряжениям основан на оценке прочности материала в опасном сечении. При таких расчетах наибольшие нормальные напряжения в опасном сечении сравниваются с допускаемыми напряжениями.

Если наибольшие напряжения, которые возникают в конструкции, не превышают допускаемых, то считается, что необходимый запас прочности обеспечен.

Такой способ расчета на прочность называют расчетом по допускаемым напряжениям.

Условие прочности бруса, работающего на осевое растяжение (сжатие), имеет вид [30, 31]:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \leq [\sigma], \quad (1.1)$$

где σ_{max} – наибольшее по абсолютному значению нормальное напряжение в элементе искусственного сооружения, т.е. напряжение в опасном сечении,

N – продольное усилие в элементе искусственного сооружения,

$[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение в элементе искусственного сооружения.

Рассматриваемый способ оценки надежности обладает рядом существенных недостатков:

1. Не учитываются пластические свойства бетона. Модуль упругости бетона принимается за постоянную величину, тогда как на самом деле зависит от величины напряжений, состава, возраста бетона и других трудно учитываемых факторов.
2. Не учитывается работа бетона в пределах растянутой зоны.
3. Не позволяет определять действительных напряжений в бетоне и арматуре, находить разрушающую нагрузку.
4. Коэффициент запаса общий, не учитывающий влияние различных факторов на надежность искусственного сооружения.

К детерминированным способам оценки надежности также относится способ оценки надежности с помощью метода расчета по **разрушающим нагрузкам**.

В результате обширных исследований, проведенных советскими учеными, среди которых А. Ф. Лолейт, А. А. Гвоздев и др., в начале 30-х годов был разработан способ оценки надежности с помощью метода расчета по разрушающим нагрузкам, учитывающий упругопластические свойства железобетона, который был включен в нормы проектирования

железобетонных конструкций, введенные в действие в 1938 г., и позднее развит немецким ученым **Людвигом Прандтлем** (1875–1953), чьим именем названа условная диаграмма напряжений - диаграмма Прандтля.

К недостаткам способа оценки надежности с помощью метода расчета по разрушающим нагрузкам можно отнести следующие:

1. Коэффициент запаса общий, не учитывающий влияние различных факторов на надежность искусственного сооружения.
2. Данный метод не дает возможности оценить работу конструкции при эксплуатационных нагрузках.

1.2.2 Методы расчета по предельным состояниям

К способам оценки надежности относятся методы расчета по предельным состояниям.

Методы расчета, разработанные советскими учеными **проф. Н. С. Стрелецким, проф. А. А. Гвоздевым**, относятся к методам расчета по предельным состояниям.

Метод расчета по предельным состояниям [32, 33, 37] был введен в СССР в качестве руководящего принципа расчетов строительных конструкций с 1 января 1955 г. при утверждении первого издания строительных норм и правил. В дальнейшем расчет по предельным состояниям завоевал широкое признание во всем мире, и в настоящее время он положен в основу большинства международных и национальных стандартов по проектированию, в частности, в систему Еврокодов, где он получил название «метод частных коэффициентов надежности».

В основу метода заложен расчет конструкций по следующим предельным состояниям:

- первой группы — по потере несущей способности и (или) полной непригодности к эксплуатации конструкций;

– второй группы — по затруднению нормальной эксплуатации сооружений.

К предельным состояниям первой группы относятся:

1. общая потеря устойчивости формы;
2. потеря устойчивости положения;
3. разрушение любого характера;
4. переход конструкции в изменяемую систему;
5. качественное изменение конфигурации;
6. состояния, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации в результате текучести материала.

Первая группа по характеру предельных состояний разделяется на две подгруппы: по потере несущей способности (первые пять состояний) и по непригодности к эксплуатации (шестое состояние) вследствие развития недопустимых по величине остаточных перемещений (деформаций).

К предельным состояниям второй группы относятся состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию или снижающие долговечность вследствие появления:

1. недопустимых перемещений;
2. недопустимых прогибов;
3. недопустимых осадок;
4. недопустимых углов поворота;
5. недопустимых колебаний;
6. недопустимых трещин и т. п.

Предельные состояния первой группы проверяются расчетом на максимальные (расчетные) нагрузки и воздействия, возможные при нарушении нормальной эксплуатации, предельные состояния второй группы – на эксплуатационные (нормативные) нагрузки и воздействия, отвечающие нормальной эксплуатации конструкций.

Условие для первой группы предельных состояний по несущей способности может быть записано в общем виде [32, 33]:

$$N \leq S, \quad (1.2)$$

где N — усилие, действующее в рассчитываемом элементе конструкции искусственного сооружения, то есть функция нагрузок и других воздействий,

S - предельное усилие, которое может воспринять рассчитываемый элемент, то есть функция физико-механических свойств материала, условий работы и размеров элементов.

Будучи по форме детерминированным, он идейно основан на использовании методов статистического анализа при нахождении коэффициентов надежности.

К недостаткам метода предельных состояний можно отнести следующие:

1. В данном методе частные коэффициенты запаса – коэффициенты надежности по нагрузке, по материалу, коэффициенты условий работы, коэффициенты надежности по назначению рассчитываются с помощью методов статистического анализа. Условная система упомянутых коэффициентов надежности была предложена в 1945 г. **И. И. Гольденблатом, М. Г. Костюковским и А. Н. Поповым** и положена в основу схемы расчета для разработки строительных норм и правил. Надежность конструкций при проектировании обеспечивается путем введения частных коэффициентов запаса: коэффициента надежности по нагрузке и коэффициента надежности по материалу, а также коэффициентов условий работы и коэффициентов надежности по назначению. Величины всех перечисленных выше коэффициентов не имеют достаточного теоретического и экспериментального обоснования. Но при этом в формулу (1.2) вводятся определенные расчетные значения, для которых вводятся определенные зависимости и результат принимает вполне определенное значение, то есть зависимости являются детерминированными [38].

2. В методе предельных состояний деформационный расчет практически отделен от прочностного. В прочностном расчете материал

предполагается в пластичном состоянии, то в деформационном расчете этот же материал предполагается упругим [39].

3. Данный метод не позволяет вывести зависимость вероятности безотказной работы от времени.

1.2.3 Вероятностные методы

К вероятностным способам относятся способы оценки надежности с использованием методов расчета, подразделяющихся на:

- вероятностный метод расчета с использованием среднестатистических данных для расчета надежности сложных технических систем [40];
- вероятностный метод расчета [41-47] с использованием стационарного коэффициента оперативной готовности:

$$R(t_0) = \frac{1}{T + \tau} \int_{t_0}^{\infty} P(x) dx, \quad (1.3)$$

где T – значение средней наработки до отказа,

τ – значение среднего времени восстановления.

- вероятностный метод расчета [42] на основе расчета коэффициента оперативной готовности:

$$R(t_0) = \frac{1}{T + \tau} \int_{t_0}^{\infty} [1 - \bar{F}(t)] dt, \quad (1.4)$$

где $\bar{F}(t)$ – стационарное распределение наработки между отказами, т. е.

$$\bar{F}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(t),$$

$F_n(t)$ – распределение наработки до n -го отказа, после $n-1$ восстановления.

- вероятностный метод расчета на основе расчета коэффициента эксплуатационной готовности [48]. Первый коэффициент равен вероятности того, что ремонтируемый объект будет находиться в работоспособном

состоянии в заданный момент времени. Второй коэффициент равен вероятности того, что объект в какой-то момент будет работоспособен и будет работа без сбоев в течение заданного интервала времен:

$$K = \frac{T}{T + \tau} \quad (1.5)$$

– вероятностный метод расчета с использованием данных обследований, позволяющих уточнить расчеты надежности сложных технических систем, то есть расчет надежности по фактическому техническому состоянию.

Метод Н. С. Стрелецкого относится к вероятностным методам расчета с использованием среднестатистических данных [47].

В данном методе введено понятие «гарантия неразрушимости».

Пусть кривая распределения прочности характеризуется математическим ожиданием $\bar{\Phi}$ и среднеквадратичным отклонением $\hat{\Phi}$, а кривая распределения усилия от нагрузки — соответственно \bar{F} и \hat{F} . Эти кривые пересекаются в одной точке, представленной на рисунке 1.1, соответствующей несущей способности Φ_o и усилию от нагрузки — F_o .

Значения $\Phi_o = F_o$ зависят от общего коэффициента запаса и могут быть приняты за расчетные. Для оценки безопасной работы конструкции Н. С. Стрелецкий ввел понятие «гарантия неразрушимости» и дал простой способ ее определения:

$$\Gamma = 1 - w_1 w_2, \quad (1.6)$$

где w_1 - вероятность того, что прочность конструкции получит заниженное значение,

w_2 - вероятность того, что нагрузка получит завышенное значение.

Вероятности w_1 и w_2 определяются по формулам:

$$w_1 = \int_{-\infty}^{\Phi_o} f(\Phi) d\Phi, \quad (1.7)$$

$$w_2 = \int_{F_0}^{\infty} f(F)dF, \quad (1.8)$$

где Φ_0 – точка пересечения кривой распределения прочности и кривой распределения усилия от нагрузки, соответствующая несущей способности,

F_0 – точка пересечения кривой распределения прочности и кривой распределения усилия от нагрузки, соответствующая усилию от нагрузки.

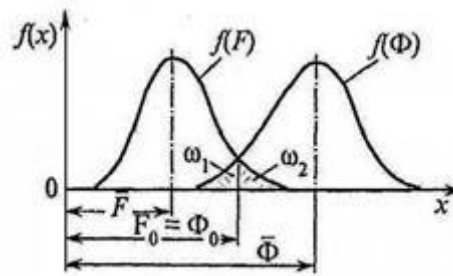


Рисунок 1.1 – «Гарантия неразрушимости»

Недостатком данного метода является то, что гарантия неразрушимости служит примерной и завышенной оценкой вероятности безотказной работы, т. к. не учитывает все возможные сочетания нагрузок и несущей способности.

Метод Ржаницына относится к вероятностным методам с использованием среднестатистических данных [38].

В методе Ржаницына усилие от нагрузки описывается случайной величиной с плотностью распределения $f_F(F)$, а прочность принимает одно детерминированное значение $\Phi_{дет}$. Тогда отказ наступит, когда усилие от нагрузки превысит значение прочности $\Phi_{дет}$, $F - \Phi_{дет} > 0$ с вероятностью Q , равной:

$$Q = \int_{\Phi_{дет}}^{F_{max}} f_F(F)dF, \quad (1.9)$$

где F_{max} - максимальное значение усилия.

Закон распределения разности случайных величин:

$$f(\Phi) = \int_{\Phi_{min}}^{\Phi_{max}} f_{\Phi}(\Phi)f_F(\Phi-\psi)d\Phi, \quad (1.10)$$

где Φ_{min} , Φ_{max} - минимальное и максимальные значения несущей способности.

К недостаткам метода Ржаницына можно отнести следующее: необходимо знать плотность распределения усилия, а также плотность распределения несущей способности, что не всегда является возможным.

Метод В. В. Болотина относится к вероятностным методам с использованием среднестатистических данных [47].

Полная формула вероятности безотказной работы по методу Болотина выражается формулой:

$$P(t) = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} Q \left(F \geq \frac{\Phi}{x_1, x_2, \dots, x_n; t} \right) x f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.11)$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – совместная плотность вероятностей параметров,

Q – условная вероятность $Q(F > \Phi/x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ того, что нагрузка F превышает несущую способность Φ при фиксированных значениях параметров прочности x_1, x_2, \dots, x_n за период времени t .

В монографии [49] подробно изучены методы прогнозирования сроков службы железобетонных конструкций. Изучены методы прогнозирования трещиностойкости железобетонных конструкций с учетом фактора времени, методы прогнозирования раскрытия трещин на основе вероятностных методов, произведена вероятностная оценка деформаций железобетонных конструкций, рассмотрена методика прогнозирования сроков службы железобетонных конструкций по признаку карбонизации защитного слоя бетона, произведена оценка сроков службы железобетонных конструкций при коррозии арматуры, произведена оценка надежности и сроков службы железобетонных конструкций по выносливости бетона при случайных воздействиях, определены сроки службы железобетонных конструкций по выносливости арматуры.

Однако, подходы, изложенные в данной монографии, не подходят для построения эксплуатации системы искусственных сооружений.

В приведенных методах сравнивается значение нагрузки со значениями несущей способности, используя аппарат теории вероятности, позволяющий учесть случайный характер этих величин. Но данные методы не позволяют

учесть фактическое техническое состояние сложной технической системы, такой как искусственное сооружение. Также данные методы не позволяют выявить элементы, которые необходимо заменить раньше других для продления ресурса искусственного сооружения.

С целью устранения недостатков присущих рассмотренным способам в работе предложен новый подход, основанный на применении вероятностных методов и алгоритмов управления состоянием СТС, который является оптимальным для расчета их надежности.

Для эффективной эксплуатации СТС необходимо осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностному методу с учетом фактического технического состояния этих элементов.

Предлагаемый подход к расчету и прогнозированию технического состояния СТС позволяет рассмотреть проблему надежности СТС более глобально. Наряду с задачей расчета надежности в данный момент времени эксплуатации СТС, т. е. задачей фиксации текущего технического состояния, а также задачей прогнозирования этого состояния в будущем с помощью расчета изменения показателей надежности, в данной работе задача рассматривается в более общей постановке как задача достижения заданных показателей надежности СТС в заданные моменты времени, т. е. задача управления техническим состоянием СТС.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Общий подход к управлению техническим состоянием сложной технической системы

Для обеспечения эксплуатационной надежности сложных технических систем (СТС) необходима оптимальная организация их технического обслуживания.

При планировании частоты обслуживания можно выделить два принципиально разных подхода:

– с постоянным периодом между обслуживаниями, рассчитанным по некоторым усредненным для систем показателям, т.е. обслуживание по нормативу [50];

– с переменным периодом, определяемым на основе оценки фактического состояния систем, т.е. обслуживание по фактическому состоянию.

В настоящее время периодичность замен или ремонтов элементов СТС, например таких как искусственные сооружения на железных дорогах определяется на основании среднестатистических данных. Нормативные сроки, определенные на основании этих данных, представлены в документе «Технические условия на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России» [50].

Таким образом, нормативный (проектный) срок службы СТС, например, пролетных строений проектируемых мостов определяется на основе среднестатистических данных для различных конструкций систем. Однако, реальные параметры материалов отличаются от среднестатистических, в элементах конструкции искусственных сооружений имеются дефекты изготовления, допускаются отступления от требуемой технологии их создания, реальные климатические условия эксплуатации отличаются от заданных и т. д. Таким образом, фактическое поведение конструкций в

действительных условиях эксплуатации при реально действующих внешних нагрузках и природно-климатических факторах отличается от расчетной модели [51 - 66].

Прогнозируемый срок службы СТС, например, пролетного строения моста должен рассчитываться на основании фактического технического состояния с учетом таких фактических данных как:

- состояние материала конструкции;
- износ конструкции;
- интенсивность и характера нагрузки на данном участке железной дороги и изменение этих данных во времени;
- предполагаемый уровень грузонапряженности в перспективе;
- географическое положение объекта (климатический район).

Следовательно, вместо управления техническим состоянием СТС на основе нормируемых межремонтных сроков необходимо осуществлять управление его техническим состоянием по фактическому состоянию. Такой подход позволяет с достаточной точностью спрогнозировать общее состояние СТС, а также состояние всех его элементов в любой момент времени после ввода системы в эксплуатацию.

Таким образом, появляется возможность проводить работы по поддержанию системы в работоспособном состоянии, опираясь не на усредненные нормы, а на фактическое, т. е. реальное, состояние данной системы, например моста. Следствием чего будет являться повышение надежности СТС в целом, ее отдельных элементов, а также существенное снижение затрат на эксплуатацию.

В настоящее время эта стратегия может быть использована для того чтобы минимизировать затраты на эксплуатацию с учетом требуемого уровня вероятности безотказной работы.

Предлагаемый подход к расчету и прогнозированию СТС позволяет рассмотреть проблему надежности СТС более глобально. Наряду с задачей расчета надежности в данный момент времени эксплуатации СТС, т. е. задачей

фиксации текущего технического состояния, а также задачей прогнозирования этого состояния в будущем с помощью расчета изменения показателей надежности, мы рассматриваем задачу в более общей постановке. Речь идет не только и не столько о расчете показателей надежности СТС в текущий и последующие моменты времени эксплуатации, а о том, чтобы достичь заданных показателей надежности СТС в заданные моменты времени, т. е. не о фиксации, а об управлении техническим состоянием.

В данной главе изложен общий подход к управлению техническим состоянием СТС и рассмотрены основные разработанные методы: рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС и метод управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

В диссертационной работе решается задача достижения минимума затрат на эксплуатацию, выраженного целевой функцией, при условии обеспечения заданного уровня надежности, выраженного вероятностью безотказной работы, которая должна быть не ниже предельно допустимого значения P_0 .

Задача достижения минимума затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданного уровня надежности ставится следующим образом.

Пусть:

$\bar{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)$ - набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС;

n – количество элементов СТС;

$\Psi(\bar{\tau}) = Z_{\text{э}}(\bar{\tau}) + Z_{\text{с}}(\bar{\tau}) + Z_{\text{в}}(\bar{\tau})$ - целевая функция;

$Z_{\text{э}}(\bar{\tau})$ - стоимость замен (ремонтов) элементов СТС;

$Z_{\text{с}}(\bar{\tau})$ - затраты на выезд специалистов для замен (ремонтов) элементов СТС;

$Z_{\text{в}}(\bar{\tau})$ - стоимость времени работы элементов СТС, которые были заменены раньше времени своей оптимальной замены;

$P(t)$ - вероятность безотказной работы;

P_0 - предельно допустимое значение вероятности безотказной работы.

Пусть заданы: $\Psi(\bar{\tau})$, $P(t)$, $\bar{\tau}$, $Z_3(\bar{\tau})$, $Z_c(\bar{\tau})$, $Z_B(\bar{\tau})$.

Найти: оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС, удовлетворяющий системе:

$$\begin{cases} \Psi(\bar{\tau}) \rightarrow \min, \\ P(t) \geq P_0 \quad \forall t > 0. \end{cases} \quad (2.1)$$

Затраты определяются из нормативных документов, методик и экспертных оценок. Вероятность безотказной работы $P(t)$ не должна быть ниже предельно допустимого значения P_0 . Например, для искусственных сооружений на железных дорогах России предельное значение установлено инструкцией по оценке состояния и содержания искусственных сооружений и равно 0.9845 [52].

Объектом управления является СТС, например, железнодорожный мост, состоящий из большого количества элементов, таких как пролетные строения, опорные части, подферменные блоки, устои, ригеля, опоры.

Субъектом управления является эксплуатирующая организация, например, дистанция пути. Исходными данными для управления являются результаты обследования технического состояния, а также пропущенная нагрузка.

Механизмом управления являются проводимые в определенные моменты времени замены и ремонты элементов конструкции СТС, при чем эти определенные моменты времени формируются не на основе нормативных сроков, а рассчитываются на основе математических методов, учитывающих фактическое техническое состояние СТС и всю предыдущую историю эксплуатации СТС.

Целевой функцией управления техническим состоянием является величина затрат на эксплуатацию СТС, т.е. функция приспособленности. Критерием эффективности управления является минимум целевой функции при выполнении заданных ограничений, то есть минимизация затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности. Это

фактически означает эксплуатацию СТС в соответствии с критерием «надежность – затраты», что обеспечивает экономический эффект и безопасность эксплуатации одновременно.

Для управления техническим состоянием СТС необходимо произвести количественную оценку фактического технического состояния, для чего требуется задать функцию износа, которая соответствует функции отказа из теории надежности, что рассмотрено в параграфе 2.2, а также рассчитать надежность, что изложено в параграфах 2.3, 2.4 и 2.6. Для выбора функции отказа проанализированы различные законы распределения.

2.2 Расчет фактического технического состояния сложных технических систем

2.2.1 Исходные данные для методов управления техническим состоянием СТС

Для решения задачи обеспечения заданной надежности применяются несколько методов: рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС и метод управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Исходные данные для последующих методов получаются из метода расчета параметров функции отказов элемента СТС. На основании проведенных уполномоченными организациями обследований на основе методики АСУ ИССО вычисляются вероятности безотказной работы элементов СТС, на основании которых и данных о прошедшей нагрузке для каждого элемента СТС рассчитываются параметры функции отказов элемента $F(t)$ [52, 53].

Первый метод - рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС. С использованием метода расчета параметров

функции отказов для каждого элемента СТС определяется функция надежности $\bar{F}(t)$. Функции надежности и классификация элементов СТС является входными данными для рекуррентного метода, который позволяет рассчитать зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени. По этой зависимости можно рассчитать момент времени τ_c , при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т.е. срок эксплуатации СТС. Таким образом, первый метод применяется для обеспечения заданного уровня надежности в поставленной задаче.

Второй метод - метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. Из нормативных документов, методик и экспертных оценок определяются такие исходные данные для этого метода, как: время эксплуатации, средние длительности планового и внепланового ремонта и интервал безотказности, а из метода расчета параметров функции отказов любого элемента СТС определяются функции $F(t)$. Метод управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами позволяет произвести расчет оптимального интервала замены (ремонта) τ_o для каждого элемента СТС. Этот метод применяется для решения задачи достижения минимума затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданного уровня надежности за счет того, что элемент заменяется или ремонтируется в оптимальное время, которое не может быть уменьшено, так как это увеличит затраты, и не может быть увеличено, так как это не обеспечит надежность.

Третий метод (подробно изложенный в 3 главе) - применение генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. С помощью генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на

эксплуатируемый объект вычисляется оптимальный набор интервалов замен (ремонт) элементов для всей СТС $\bar{\tau}_0$, который доставляет минимум целевой функции и удовлетворяет заданному ограничению на совокупность интервалов, т.е. позволяет достигнуть решения поставленной задачи (2.1).

Таким образом, применение описанных методов позволяет решить задачу управления техническим состоянием СТС, которая заключается в достижении минимума затрат на эксплуатацию, при условии обеспечения заданного уровня надежности.

На основе данных методов и алгоритмов разработан программный комплекс для расчета оптимальной эксплуатации сложных технических систем в соответствии с критерием «надежность – затраты».

2.2.2 Расчет и прогнозирование надежности сложных технических систем

Для построения функции надежности $\bar{F}(t)$ для каждого элемента $\bar{F}(t)$ необходимо задать функцию отказа $F(t)$ из теории надежности [12, 21].

Для выбора функции надежности $\bar{F}(t)$, т. е. вероятности того, что элемент СТС проработает время, большее или равное заданному времени x , для каждого элемента необходимо рассмотреть различные законы распределения и выбрать из них такой, чтобы функция надежности для элемента $\bar{F}(t)$, построенная на его основе, в наибольшей степени соответствовала фактической эксплуатации такого рода объектов в реальных условиях.

Для построения функции отказа $F(t)$ были рассмотрены следующие типичные законы распределения [12, 54, 55]:

– нормальное распределение

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx; \quad (2.2)$$

– гамма-распределение

$$F(t) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \int_0^t x^{\lambda-1} e^{-x} dx, \quad (2.3)$$

где $\Gamma(\lambda)$ – гамма-функция или факториальная функция;

– логарифмически-нормальное распределение

$$F(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right], \quad (2.4)$$

где σ – параметр логарифмически-нормального распределения;

– распределение Вейбулла

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tilde{\beta}}\right)^{\tilde{\alpha}}}, \quad (2.5)$$

где $\tilde{\alpha}$ – параметр формы и $\tilde{\beta}$ – масштабный параметр;

– экспоненциальное распределение, являющееся частным случаем распределения Вейбулла

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2.6)$$

где λ – параметр распределения, $\lambda > 0$.

Для экспоненциального закона отказ элемента на заданном интервале зависит только от длины этого интервала и не зависит от предшествующего времени работы [54], в то время как для элементов СТС, например металлического пролетного строения, отказ должен зависеть от времени предшествующей работы. Следовательно, из дальнейшего рассмотрения экспоненциальный закон можно исключить [56].

Нормальный закон хорошо моделирует постепенные отказы, которые возникают в результате накапливающихся повреждений [54]. Однако, для нормального закона коэффициент асимметрии равен нулю, поэтому нормальный закон не учитывает резкое увеличение количества отказов и, соответственно, скорости износа после прохождения математического

ожидания, т. е. среднего времени функционирования элемента, по сравнению с периодом, непосредственно предшествующим этому времени. Кроме этого, нормальный закон не учитывает наличие внезапных отказов. Следовательно, в дальнейшем нормальный закон не станем рассматривать.

Для гамма-распределения и логарифмически-нормального распределения коэффициент асимметрии положительный, а для моделирования резкого увеличения количества скорости износа после прохождения среднего времени функционирования элемента необходим отрицательный коэффициент асимметрии. Поэтому перечисленные законы для моделирования изучаемых процессов из дальнейшего рассмотрения исключаем.

В законе распределения Вейбулла $F(t)=1-\exp(-(t/\tilde{\beta})^{\tilde{\alpha}})$, где $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ – параметры, отрицательный коэффициент асимметрии, что на основании вышеизложенных аргументов соответствует исследуемым процессам старения элементов СТС, в частности резкому увеличению количества отказов и, соответственно, скорости износа после наступления среднего времени функционирования элемента.

Кроме этого, закон Вейбулла помимо накапливающихся отказов моделирует и внезапные отказы, а также учитывает наличие или отсутствие скрытых дефектов [54]. Для элементов с часто встречающимися скрытыми дефектами, которые в течение длительного времени не стареют, опасность отказа высокая в начале эксплуатации, а впоследствии резко падает. Для таких элементов целесообразно использовать закон Вейбулла с параметром $\tilde{\alpha} < 1$. Если у элементов скрытые дефекты встречаются редко, но стареют они быстро, то опасность отказа таких элементов монотонно возрастает. Такие элементы хорошо моделируются законом Вейбулла с параметром $\tilde{\alpha} > 1$.

Таким образом, на основании проведенного анализа из всех рассмотренных законов распределения в качестве наиболее рационального

был выбран закон Вейбулла, так как кривая функции $1 - F(t)$, где $F(t)$ – функция распределения в законе Вейбулла, в наибольшей степени соответствует кривой функции надежности $\bar{F}(t)$, т. е. вероятности того, что элемент СТС проработает время, большее или равное заданному времени t , для каждого элемента СТС, например, такого как элемент искусственного сооружения, в частности, быстрее убывает после прохождения точки среднего времени функционирования элемента, чем до этой точки.

Зависимость отказа элемента СТС от времени будем описывать функцией распределения Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tilde{\beta}}\right)^{\tilde{\alpha}}}, \quad (2.7)$$

где $\tilde{\alpha}$ – параметр формы и $\tilde{\beta}$ – масштабный параметр.

Для определения параметров функции распределения вероятности безотказной работы необходимо провести обследования СТС, например таких как искусственные сооружения на железных дорогах. При проведении обследования для каждого элемента СТС рассчитывается бальная оценка его технического состояния с помощью «Инструкции по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации». Далее бальная оценка может быть переведена в вероятность безотказной работы по методике, изложенной в АСУ ИССО.

По полученной таким способом после проведения одного обследования вероятности безотказной работы и известной прошедшей нагрузки к моменту этого обследования вычисляется один из параметров функции распределения, если второй параметр считать известным. При проведении двух обследований можно вычислить оба параметра функции распределения вероятности безотказной работы. При проведении последующих обследований параметры функции распределения Вейбулла уточняются. Таким образом, для каждого

элемента СТС подбираются и, впоследствии, уточняются свои параметры функции распределения Вейбулла.

На основе расчета износа и выбора функций отказа для всех элементов СТС можно рассчитать показатели технического состояния СТС в целом, что будет сделано в параграфе 2.3. Это делается с помощью рекуррентного метода расчета надежности на основе классификация элементов СТС в соответствии с их влиянием на отказ работы всей системы в целом.

2.2.3 Метод расчета параметров функций отказов СТС

Для реализации метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющего вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента, который обеспечивает максимум вероятности того, что элемент не отказал к этому моменту и безотказно проработает в течение интервала безотказности и рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов СТС необходимо осуществить расчет параметров выбранного закона распределения Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}} . \quad (2.8)$$

Для этого воспользуемся данными из АСУ ИССО. Для определенного обследования и определенного элемента необходимо взять вероятность безотказной работы этого элемента.

Затем, зная количество прошедших миллионов тонн Брутто, и вероятность безотказной работы, можно рассчитать параметры функции распределения Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}} . \quad (2.9)$$

Таким образом, получив данные по двум обследованиям, рассчитываем два параметра функции Вейбулла:

$$\begin{cases} F_1 = 1 - e^{-\left(\frac{t_1}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}, \\ F_2 = 1 - e^{-\left(\frac{t_2}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Из системы уравнений (2.10) находим для закона Вейбулла с двумя параметрами: масштабный параметр $\tilde{\beta}$ и параметр формы $\tilde{\alpha}$.

2.3 Рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС

2.3.1 Выбор метода расчета надежности сложных технических систем

Для обеспечения безопасного и бесперебойного движения подвижного состава по железным дорогам необходимо рассчитывать надежность СТС, таких как искусственные сооружения, и прогнозировать ее изменение.

Искусственные сооружения являются СТС и обладают всеми свойствами, присущими таким системам [57, 58]. Для расчета надежности СТС используются следующие основные методы [59, 60]:

- метод структурных схем;
- схемно-функциональный метод;
- метод логических схем.

Однако СТС, такие как искусственные сооружения на железных дорогах, обладают рядом специфических особенностей, учет которых необходим при выборе метода расчета надежности [26].

Перечислим наиболее важные из этих особенностей.

Во-первых, искусственное сооружение — это СТС, состоящая из большого количества элементов с различной степенью вклада этих элементов в безотказную работу сооружения, что позволяет сформировать различного рода взаимосвязи между ними. Степень вклада элемента в безотказную работу

сооружения мы будем называть критичностью этого элемента, а степень взаимосвязи между элементами в системе будем описывать с помощью понятия конгломеративности.

Во-вторых, искусственное сооружение — это сложная функциональная система, в которой не обеспечивается выполнение условия ординарности, то есть все события могут происходить одновременно и поэтому являются совместными, что дает возможность использовать теорему сложения вероятностей совместных событий.

В-третьих, искусственное сооружение — это сложная система, структурную схему которой можно описать в виде графа, что позволяет построить ее математическую модель с использованием теории графов и алгебры логики.

В-четвертых, искусственное сооружение — это система, структурная схема которой, при математическом описании, настолько сложна, что не сводится к последовательным, параллельным или древовидным структурам.

В-пятых, искусственное сооружение — это система, самой важной функцией которой является обеспечение безопасного и бесперебойного движения подвижного состава с установленными скоростями.

Рассмотрим методы расчета надежности СТС из перечисленных выше и определим, какой из них является наиболее подходящим для расчета надежности СТС, например искусственных сооружений с учетом их специфических особенностей.

Метод структурных схем.

Этот метод основан на построении единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных структур.

Этот метод применяется в следующих случаях [61]:

— когда элементы системы рассматриваются как элементы с равнозначной степенью вклада в вероятность безотказной работы всей системы;

– когда событие относится только к одному элементу или только к одной подсистеме, то есть должно соблюдаться условие ординарности;

– когда система представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из последовательных и параллельных соединений элементов.

Однако, искусственные сооружения на железных дорогах являются системами с различной степенью вклада элементов в безотказную работу системы, что противоречит первому условию [20]. Также для искусственных сооружений не выполняется условие ординарности. Кроме того, искусственное сооружение, как правило, не может быть представлено только в виде последовательных и параллельных соединений. Следовательно, метод структурных схем не подходит для расчета надежности искусственных сооружений.

Схемно-функциональный метод.

Этот метод применяется для оценки надежности возможных несовместных событий для всех элементов системы в зависимости от их влияния на выполняемые функции.

Искусственное сооружение — это система, в которой реализуются совместные события, поэтому схемно-функциональный метод не применим к искусственным сооружениям вообще и на железных дорогах в частности.

Метод логических схем.

Сущность этого метода заключается в построении полной группы событий, характеризующих состояние работоспособности системы при помощи алгебры логики. Метод логических схем позволяет учитывать различную степень вклада элементов в безотказную работу системы, позволяет описывать системы, которые не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам, а также позволяет рассматривать системы, которые не удовлетворяют условию ординарности.

Таким образом, метод логических схем является наиболее подходящим для расчета надежности СТС, таких как искусственные сооружения на железных дорогах, так как учитывает наиболее важные специфические

особенности искусственных сооружений как СТС. Одной из реализаций метода логических схем является рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС, который будет рассмотрен в следующем пункте.

2.3.2 Классификация элементов сложной технической системы

Для применения рекуррентного метода к СТС, таким как искусственные сооружения на железных дорогах, построим математический метод взаимосвязи и взаимовлияния элементов СТС и их влияния на систему в целом. Для реализации этого метода элементы СТС, которой является искусственное сооружение на железной дороге, необходимо классифицировать в соответствии с их влиянием на отказ работы всей системы в целом.

Для каждого i -го элемента СТС введем коэффициенты α_i , β_i , γ_i , где $i=1, \dots, N$, а N – количество элементов в СТС.

Коэффициент критичности α_i характеризует критичность i -го элемента, то есть степень влияния отказа элемента на отказ всего искусственного сооружения.

$\alpha_i = 1$, если элемент критичный, то есть его отказ приводит к отказу всей системы в целом;

$\alpha_i = 0$, если элемент не критичный, то есть его отказ не приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициент групповой конгломерации β_i характеризует конгломеративность i -го элемента, то есть свойство элемента в случае отказа его и определенного количества соседних элементов приводить к отказу всей системы в целом.

$\beta_i = 1$, если элемент конгломеративный, то есть его отказ и одновременный отказ определенного количества соседних элементов приводит к отказу всей системы в целом, а его отказ и отказ меньшего количества соседних элементов не приводит к отказу всей системы в целом.

$\beta_i = 0$, если элемент неконгломеративный, то есть не обладает свойством конгломеративности.

Коэффициент работоспособности γ_i характеризует степень вклада i -го элемента в работоспособность системы в целом. На этот коэффициент умножается вероятность безотказной работы элемента во всех формулах при расчете вероятности безотказной работы всей системы в целом.

При $\gamma_i = 1$ вероятность безотказной работы элемента не изменяет своего значения при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом, то есть элемент вносит вклад в вероятность безотказной работы системы в целом равный его собственной вероятности безотказной работы.

При $\gamma_i = 0$ вероятность безотказной работы элемента становится равной нулю при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом.

При $0 < \gamma_i < 1$ вероятность безотказной работы элемента уменьшает свое значение при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом, то есть элемент вносит вклад в вероятность безотказной работы системы в целом меньший, чем его собственная вероятность безотказной работы.

С учетом свойств критичности и конгломеративности элементы системы можно классифицировать следующим образом.

1. **Критичный элемент** – это такой элемент, отказ которого приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 1, \\ \beta_i &= 0, \\ \gamma_i &= \begin{cases} 1, & \text{при } p^* < p_i \leq 1, \\ 0, & \text{при } 0 \leq p_i \leq p^*, \end{cases} \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $i = 1, \dots, N$, N - количество элементов системы,

α_i - коэффициент критичности i -го элемента,

β_i - коэффициент групповой конгломерации i -го элемента,

γ_i - коэффициент работоспособности i -го элемента,

p^* - предельная вероятность безотказной работы элемента, при которой элемент считается неработоспособным, то есть максимальная вероятность безотказной работы, описывающая состояние неработоспособности.

2. **Критичный конгломерирующий элемент** – это такой элемент, отказ которого влияет на показатели надежности всей системы в целом, но не приводит к ее отказу, однако, если отказывает группа рядом расположенных таких элементов, то это приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 1, \\ \beta_i &= 1, \\ \gamma_i &= \begin{cases} 1, & \text{при } n \leq k, p^* < p_i \leq 1, \\ 0, & \text{при } n > k, p^* < p_i \leq 1, \\ 0.9, & \text{при } n \leq k, \text{ при } 0 \leq p_i \leq p^*, \\ 0, & \text{при } n > k, \text{ при } 0 \leq p_i \leq p^* \end{cases} \quad (2.12) \end{aligned}$$

где $i = 1, \dots, N$, N - количество элементов системы,

k - максимальное количество отказавших соседних элементов, при котором не происходит отказ всей системы в целом,

n – количество отказавших соседних элементов,

α_i - коэффициент критичности i -го элемента,

β_i - коэффициент групповой конгломерации i -го элемента,

γ_i - коэффициент работоспособности i -го элемента,

P^* - предельная вероятность безотказной работы элемента, при которой элемент считается неработоспособным, то есть максимальная вероятность безотказной работы, описывающая состояние неработоспособности.

3. **Некритичный конгломерирующий элемент** – это такой элемент, отказ которого не влияет на показатели надежности всей системы в целом, но если отказывает группа рядом расположенных таких элементов, то это приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\alpha_i = 0,$$

$$\beta_i = 1,$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k \\ 0, & n > k' \end{cases} \text{ при } P^* < P_i \leq 1,$$

$$\begin{cases} 1, & n \leq k \\ 0, & n > k' \end{cases} \text{ при } 0 \leq P_i \leq P^*,$$
(2.13)

где $i = 1, \dots, N$, N - количество элементов системы,

k - предельное количество отказавших соседних элементов,

n – количество отказавших соседних элементов,

α_i - коэффициент критичности i -го элемента,

β_i - коэффициент групповой конгломерации i -го элемента,

γ_i - коэффициент работоспособности i -го элемента,

P^* - предельная вероятность безотказной работы элемента, при которой элемент считается неработоспособным, то есть максимальная вероятность безотказной работы, описывающая состояние неработоспособности.

4. **Некритичный элемент** – это такой элемент, отказ которого не приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\alpha_i = 0,$$

$$\beta_i = 0,$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{при } P^* < P_i \leq 1, \\ 1, & \text{при } 0 \leq P_i \leq P^*, \end{cases}$$
(2.14)

где $i = 1, \dots, N$, N - количество элементов системы,

α_i - коэффициент критичности i -го элемента,

β_i - коэффициент групповой конгломерации i -го элемента,

γ_i - коэффициент работоспособности i -го элемента,

P^* - предельная вероятность безотказной работы элемента, при которой элемент считается неработоспособным, то есть максимальная вероятность безотказной работы, описывающая состояние неработоспособности.

Данные приведенной классификации можно свести в следующую таблицу 2.1.

Таблица 2.1– Классификация элементов

№	Классификация элементов	α_i	β_i	Вероятность безотказной работы элемента, P_i	Коэффициент работоспособности, γ_i
1	критичные	1	0	$P_i = 1$	$\gamma_i = 1$
				$P_0 < P_i < 1$	$\gamma_i = 1$
				$P_i \leq P^*$	$\gamma_i = 0$
2	критичные конгломерирующие	1	1	$P_i = 1$	$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
				$P^* < P_i < 1$	$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
				$P_i \leq P^*$	$\gamma_i = \begin{cases} 0.9, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
3	некритичные конгломерирующие	0	1	$P_i = 1$	$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
				$P^* < P_i < 1$	$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
				$P_i \leq P^*$	$\gamma_i = \begin{cases} 1, & n \leq k, \\ 0, & n > k \end{cases}$
4	некритичные	0	0	$P_i = 1$	$\gamma_i = 1$
				$P^* < P_i < 1$	$\gamma_i = 1$
				$P_i \leq P^*$	$\gamma_i = 1$

Зависимость коэффициента работоспособности γ_i от вероятности безотказной работы P_i для i -го элемента характеризует степень влияния работоспособности этого элемента на вероятность безотказной работы системы в целом.

Если зависимость имеет большую производную $\frac{d\gamma_i}{dP_i}$, то это значит, что система быстрее приближается к отказу, чем сам элемент, т. е. степень влияния большая.

Если зависимость имеет маленькую производную $\frac{d\gamma_i}{dP_i}$, то это значит, что система медленнее приближается к отказу, чем сам элемент, т. е. степень влияния маленькая.

Коэффициент работоспособности γ_i отражает явление сверхаддитивности, которое состоит в том, что в сложной системе в результате взаимосвязи между элементами результат функционирования всех элементов в системе не равен сумме результатов функционирования элементов в отдельности.

Введение весовых коэффициентов дает возможность учесть свойство сверхаддитивности СТС, которое присуще любому искусственному сооружению на железной дороге.

Математический метод расчета весовых коэффициентов является составной частью метода управления техническим состоянием СТС, так как на основе этого метода можно более точно моделировать влияние технического состояния элементов этого сооружения на техническое состояние всего сооружения в целом.

Для учета рассмотренных специфических особенностей СТС, а также классификации элементов СТС, в п. 2.3.3 введены термины и определения, учитывающие взаимосвязи элементов в СТС.

2.3.3 Учет взаимосвязи элементов сложной технической системы в рекуррентном методе

Для учета рассмотренных в пункте 2.3.1 специфических особенностей СТС, таких как искусственные сооружения на железных дорогах, а также произведенной в пункте 2.3.2 классификации элементов введем термины и

определения, учитывающие взаимосвязи элементов в СТС.

Введем специальные термины коннекта и коннективности.

Коннект — это такая совокупность элементов системы, в которую входят все критичные элементы, а также может входить или не входить какая-то часть или все элементы, относящиеся к группам критичных конгломерирующих, некритичных конгломерирующих и некритичных элементов, но при этом в каждый коннект должно входить не менее такого числа конгломерирующих элементов, находящихся в одном и том же узле, которое обеспечивает работоспособность системы.

Коннективность — это свойство системы образовывать коннекты, которые обеспечивают выполнение целевой функции системы с заданной вероятностью безотказной работы.

Сложная техническая система, очевидно, обладает свойством коннективности.

Для построения нового коннекта необходимо добавить некритичные элементы, сочетания которых в различных коннектах должны отличаться. Если коннект не включает какой-то элемент, то этот элемент некритичен. Если все коннекты включают какой-либо элемент, то этот элемент критичен.

Каждый из элементов конкретного коннекта не должен отказывать, что математически выражается как вероятность совместного появления нескольких событий. В соответствии с известной теоремой сложения вероятностей совместных событий, вероятность объединения всех коннектов системы математически выражается в виде суммы вероятностей реализации каждого из коннектов системы без учета их совместной реализации.

Таким образом, совместная реализация каждого из всех возможных совокупностей коннектов системы, т. е. каждое их пересечение, учитывается только один раз.

Для построения рекуррентного алгоритма расчета показателей надежности СТС необходимо задать матрицу смежности, в которой описаны только те элементы, которые входят либо в группу критичных

конгломерирующих, либо в группу некритичных конгломерирующих элементов. Элементы, входящие в группу критичных и некритичных элементов, в матрице смежности не описываются, т. к. их взаимное расположение не влияет на вклад этих элементов в работоспособность системы.

Пусть в узле находится g элементов, а k – предельное количество отказавших соседних элементов, т. е. максимальное количество отказавших элементов в одном узле, при котором система остается работоспособной. Тогда в каждый коннект должен входить любой набор элементов из этого узла в количестве $g-k$ штук.

Введем понятие аконнекта.

Аконнект – это любая совокупность критичных конгломерирующих, некритичных конгломерирующих и некритичных элементов, которая не должна входить в состав коннекта.

Введенные нами термины коннекта, коннективности и аконнекта используем для построения рекуррентного алгоритма расчета надежности в пунктах 2.3.4 и 2.3.5 настоящей диссертации.

2.3.4 Постановка задачи расчета надежности на основе классификации элементов СТС

Рассмотрим СТС, состоящую из большого числа разных элементов. Для эффективной эксплуатации СТС необходимо осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностным методам с учетом фактического технического состояния этих элементов.

Поскольку срок эксплуатации СТС меньше, чем срок эксплуатации любого из его элементов, необходимо с помощью вероятностного метода рассчитывать, то есть прогнозировать, срок эксплуатации всей СТС.

Данная задача состоит в расчете надежности всей СТС, который производится по построенному **рекуррентному методу** расчета надежности СТС, такой, как искусственное сооружение, изложенному в текущем параграфе, а также алгоритму, построенному на его основе, изложенному в главе 4.

Задача I: построить рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех предшествующих замен (ремонт).

Задача нахождения времени работы СТС τ_c ставится следующим образом.

Пусть: $\bar{F}(t)$ - функция надежности для каждого элемента СТС.

Пусть заданы: $\bar{F}(t)$, классификация элементов СТС.

Найти: момент времени работы СТС τ_c , при котором $P(t) = P_0$.

При этом вероятность безотказной работы всей СТС рассчитывается с помощью рекуррентного метода [5, 62, 63]:

$$P\left\{\bigvee_{i=1}^{l+1} R_i\right\} = P\left\{\bigvee_{i=1}^l R_i\right\} + P\{R_{l+1}\} - P\left\{\bigvee_{i=1}^l R_i\right\} * P\{R_{l+1}\}, \quad (2.15)$$

где R_i — i -й коннект системы, $l \in \overline{1, n-1}$,

n - общее количество элементов СТС.

2.3.5 Построение рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов сложной технической системы

При построении рекуррентного алгоритма расчета надежности СТС необходимо сформировать все возможные коннекты, а также задать функцию алгебры логики. Блок-схема данного алгоритма будет рассмотрена в главе 4. Алгоритмически это делается следующим образом [11, 13].

Вначале задается первый вектор, содержащий номера всех элементов системы. Затем задается второй вектор, содержащий номера всех элементов системы, кроме критичных, т. е. номера критичных конгломерирующих, некритичных конгломерирующих и некритичных элементов.

Затем из второго вектора формируются все возможные наборы элементов, содержащие любое возможное количество элементов. Далее все эти сформированные наборы, т. е. аконнекты, перебираются и сравниваются с первым вектором. При этом из первого вектора исключаются совпавшие номера элементов. То, что осталось после каждого такого исключения является очередным коннектом.

Если в сформировавшийся коннект входит меньше, чем $r-k$ элементов, находящихся в одном узле, где r – число элементов в узле, а k – предельное количество отказавших соседних элементов, то такой коннект исключается из дальнейшего рассмотрения.

Если в сформировавшемся коннекте присутствуют критичные конгломерирующие элементы, то для данного коннекта записывается коэффициент, учитывающий влияние таких элементов на показатели надежности системы в целом.

Пусть заданы функции надежности для каждого элемента СТС.

Найти: момент времени работы СТС τ_c при котором будет выполнено заданное ограничение, т.е. достигнут критический уровень вероятности безотказной работы P_0 .

При построении рекуррентного алгоритма расчета надежности СТС необходимо сформировать все возможные коннекты.

Для применения метода логических схем необходимо задать функцию алгебры логики [5], связывающую состояние элементов с состоянием всей СТС:

$$f(r_1, r_2, \dots, r_m) = f(r), \quad (2.16)$$

где r_1, r_2, \dots, r_m – вероятности событий, состоящих в том, что данные элементы не отказали,

$f(r)$ — функция работоспособности системы.

Вероятность безотказной работы всей СТС рассчитывается с помощью рекуррентного метода по формуле:

$$P\{\bigvee_{i=1}^{l+1} R_i\} = P\{\bigvee_{i=1}^l R_i + P\{R_{l+1}\}\} - P\{\bigvee_{i=1}^l R_i\} * P\{R_{l+1}\}, \quad (2.17)$$

где R_i — i -й коннект системы, $l \in \overline{1, n-1}$, n — количество элементов СТС.

Утверждение 1. Вероятность безотказной работы всей СТС можно рассчитать с помощью рекуррентного метода [13].

Доказательство. Рассмотрим коннект системы.

Согласно теореме сложения вероятностей и выражению (2.17), вероятность безотказной работы можно вычислить по следующей формуле:

$$P\{R_1\} = \prod_{k \in k_{R_1}} r_k. \quad (2.18)$$

Используем известные соотношения [5]:

$$\begin{aligned} P\{R_1 \vee R_2\} &= P\{R_1\} + P\{R_2\} - P\{R_1\} \cdot P\{R_2\}, \\ P\{R_1 \vee R_2 \vee R_3\} &= P\{R_1 \vee R_2\} + P\{R_3\} - P\{R_1 \vee R_2\} \cdot P\{R_3\}, \\ P\{\bigvee_{i=1}^{l+1} R_i\} &= P\{\bigvee_{i=1}^l R_i + P\{R_{l+1}\}\} - P\{\bigvee_{i=1}^l R_i\} * P\{R_{l+1}\}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где R_i — i -й коннект системы, $l \in \overline{1, n-1}$, n — количество элементов СТС.

С учетом (2.19) формула (2.18) в рекуррентной форме может быть представлена следующим образом:

$$P\left\{\bigvee_{i=1}^l R_i\right\} = P\left\{\bigvee_{i=1}^{l-1} R_i\right\} + P\{R_l\} - P\left\{\bigvee_{i=1}^{l-1} R_i\right\} * P\{R_l\}, \quad (2.20)$$

где R_i — i -й коннект системы, $l \in \overline{1, n}$, n — количество элементов СТС.

Утверждение 1 доказано.

Для применения рекуррентного метода необходимо задать функцию надежности, которая соответствует вероятности безотказной работы для данного конкретного элемента [13]. В пункте 2.2.1 на основании проведенного анализа из всех рассмотренных законов распределения в качестве оптимального был выбран закон Вейбулла.

Рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС позволяет определить вероятность безотказной работы всей системы в определенные моменты времени, а для того, чтобы рассчитать времена необходимых оптимальных замен (ремонтов) элементов необходим другой метод, который будет рассмотрен в параграфе 2.4.

Для решения задачи достижения минимума затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданного уровня надежности кроме рекуррентного метода расчета надежности необходимо построить математический метод управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, который позволяет осуществлять замены или ремонты элементов через оптимальные интервалы времени.

2.4 Математический метод управления техническим состоянием элементов сложной технической системы на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами

2.4.1 Постановка задачи управления техническим состоянием элементов сложной технической системы на основе выбранных функций отказов элементов

Рассмотрим СТС, состоящую из большого числа разных элементов. Для эффективной эксплуатации СТС необходимо осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностному методу с учетом технического фактического состояния этих элементов [10, 16, 17].

Поскольку срок замены всей СТС наступает раньше, чем сроки замен (ремонтов) её элементов, необходимо для продления срока службы всей СТС в процессе эксплуатации заменять ее отдельные элементы. В первую очередь необходимо заменить (отремонтировать) те элементы, срок замен (ремонтов) которых наступает раньше, чем у других. Для того чтобы определить срок

замен (ремонтов) всех элементов СТС необходимо использовать метод расчета оптимального интервала замен (ремонтов) элементов, изложенный в пункте 2.4.2.

Задача II: построить метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента.

Коэффициент оперативной готовности представим вероятностью $p(x, t)$ того, что в момент t элемент будет в работоспособном состоянии и после момента t элемент проработает время x .

Назовем обозначенное выше время x интервалом безотказности. За единицу времени примем интервал, в течение которого СТС испытывает единичную нагрузку.

Задача расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС ставится следующим образом.

Пусть:

t - время эксплуатации СТС;

T_1 - средняя длительность плановой предупредительной замены или ремонта элемента;

T_2 - средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта элемента;

x – интервал безотказности элемента;

$F(t)$ - функция распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами, возникающими при обнаружении отказа, т.е. функция отказов элемента;

$G(t)$ - функция распределения интервалов времени между плановыми заменами или ремонтами;

$H(t)$ - математическое ожидание числа отказов за время от 0 до t ;

$p(x, t)$ - коэффициент оперативной готовности.

Пусть заданы времена T_1, T_2, x , а также функции $F(t)$ и $H(t)$.

Найти оптимальный интервал замены (ремонта) элемента

$$\tau_0 = \arg \max_{G(t)} p(x, t), \quad (2.21)$$

где $p(x, t)$ - коэффициент оперативной готовности.

В качестве показателя надежности СТС возьмем коэффициент оперативной готовности, который характеризует способность элемента системы быть готовым к эксплуатации в произвольный момент времени и проработать после этого еще определенное время с заданной вероятностью безотказной работы, таким образом коэффициент оперативной готовности представлен вероятностью $p(x, t)$.

Ограничениями при решении задачи будут требования:

$$T_2 > T_1; \lambda'(t) > 0, \text{ где } \lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}, f(t) = F'(t); x \ll T_0, \text{ где } T_0 - \text{среднее}$$

время безотказной работы элемента .

Множеством решений данной задачи являются интервалы замены (ремонта) для конкретного элемента СТС.

Ограничением при решении задачи оптимизации будет требование считать отказом СТС момент времени, при котором вероятность безотказной работы системы достигает своего установленного предельного значения P_0 .

Критерий оптимальности решения задачи: максимизация выбранного показателя надежности $p(x, t)$ сводящаяся к выбору такого закона распределения $G(t)$, при котором вероятность $p(x, t)$ принимает максимальное значение.

В рассматриваемой задаче под **оптимальным решением** будем понимать интервал оптимальной замены (ремонта) для конкретного элемента СТС при выбранном законе распределения $G(t)$.

2.4.2 Математический метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами для вычисления оптимального интервала замены (ремонта) каждого элемента

Для построения схемы управления техническим состоянием элементов СТС помимо рекуррентного метода, представленного в пункте 2.3.5, необходимо рассчитывать времена оптимальных замен (ремонтов) всех элементов по математическому методу управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, описанному и математически обоснованному в данной диссертационной работе.

В соответствии с этой схемой управления не по нормируемым межремонтным срокам, а по фактическому техническому состоянию, необходимо построить вероятностный метод управления техническим состоянием элементов СТС, такой как искусственное сооружение [6-9].

Для этих целей необходимо осуществлять замены или ремонты элементов в соответствии с прогнозируемым сроком службы, обеспечивающим заданную вероятность безотказной работы [6 - 9].

В качестве показателя надежности СТС, такой как искусственное сооружение возьмем коэффициент оперативной готовности [7-9].

Коэффициент оперативной готовности характеризует способность элемента системы быть готовым к эксплуатации в произвольный момент времени и проработать после этого произвольного момента еще определенное время с заданной вероятностью безотказной работы.

Коэффициент оперативной готовности представлен вероятностью $p(x, t)$ [7-9].

$p(x, t)$ – вероятность того, что в момент t элемент будет в работоспособном состоянии и после момента t элемент проработает время x .

Назовем обозначенное выше время x интервалом безотказности [10, 16, 17, 63].

За единицу примем интервал времени, в течение которого по искусственному сооружению проходит нагрузка равная 1 млн. тонн.

Обозначим за T_1 среднюю длительность плановой предупредительной замены или ремонта, а за T_2 - среднюю длительность внеплановой аварийной замены или ремонта.

$G(t)$ - функция распределения интервалов времени между плановыми заменами или ремонтами, то есть заменами или ремонтами, происходящими по определенному графику.

$F(t)$ - функция распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами, то есть заменами или ремонтами, возникающих при обнаружении отказа.

$H(t)$ - математическое ожидание числа отказов за время от 0 до t .

Искусственное сооружение – сложная техническая система, функционирующая долгий период. Следовательно, коэффициент оперативной готовности $p(x, t)$ можно рассмотреть при $t \rightarrow \infty$. Обозначим:

$$p(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(x, t). \quad (2.22)$$

В нашей задачи максимизация выбранного показателя надежности $p(x, t)$ сводится к выбору такого закона распределения $G(t)$, при котором вероятность $p(x)$ принимает максимальное значение.

Утверждение 2. Показатель надежности $p(x, t)$ можно преобразовать к виду дробно-линейного функционала.

Доказательство.

Назовем профилактикой замену или ремонт работоспособного элемента.

Так как вероятность $p(x, t)$ характеризует событие, состоящее в том, что в момент времени t элемент находится в рабочем состоянии и он безотказно проработает интервал длительностью x , то это событие является суммой двух следующих событий [7-9]:

- в интервале $(0, t)$ не планируется проведение профилактик, при этом интервале $(0, t + x)$ отказа элемента не произошло;

- в момент времени ξ ($0 \leq \xi \leq t$) окончилось восстановление системы, при этом в оставшемся промежутке времени (ξ, t) не производится планового восстановления элемента и в промежутке $(\xi, t + x)$ не было внепланового восстановления элемента [10, 16, 17].

Вероятность первого события: $[1 - F(t + x)][1 - G(t)]$.

Вероятность второго события:

$$\int_0^t [1 - G(t - \xi)] [1 - F(t + x - \xi)] dH(\xi). \quad (2.23)$$

В силу несовместности этих событий коэффициент оперативной готовности можно выразить следующим образом:

$$p(x, t) = [1 - G(t)] [1 - F(t + x)] + \int_0^t [1 - G(t - \xi)] [1 - F(t + x - \xi)] dH(\xi). \quad (2.24)$$

Обозначим

$$Q(t) = [1 - G(t)][1 - F(t + x)]. \quad (2.25)$$

Чтобы в выражении (2.24) перейти к пределу при $t \rightarrow \infty$, воспользуемся узловой теоремой восстановления: для неарифметических $F(t)$ Блекуэлл [65] доказал теорему, в которой утверждается, что при любом $\alpha > 0$ и $t \rightarrow \infty$

$$H(t + \alpha) - H(t) \rightarrow \frac{\alpha}{\mu}. \quad (2.26)$$

Пусть $Q(t)$ - неотрицательная, невозрастающая функция, определенная при всех t , $Q(t) \downarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ и $\int_0^\infty Q(u) du < \infty$. Доказывается [66], что теорема Блекуэлла равносильна так называемой узловой теореме восстановления [67]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t Q(t - u) dH(u) = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty Q(u) du,$$

где μ – математическое ожидание интервала между заменами (ремонтами) элемента (либо после отказа, либо после выработанного расчетного ресурса), то есть математическое ожидание времени между двумя соседними моментами замены (ремонта) элемента.

Переходя в выражении (2.24) к пределу при $t \rightarrow \infty$, и учитывая, что первое слагаемое стремится к нулю, получим

$$p(x) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} [1 - G(t)][1 - F(t + x)] dt, \quad (2.27)$$

где μ - математическое ожидание времени между двумя соседними моментами замены (ремонта) элемента [64, 66].

Интервал между моментами обновления системы состоит из двух частей: интервала от момента окончания предыдущего обновления до момента начала восстановительных работ, который равен $\min(\theta, \eta)$, где θ - случайное время безотказной работы системы, η - случайная величина, определяющая момент последующей предупредительной профилактики. Поэтому μ находится по формуле полного математического ожидания:

$$\begin{aligned} \mu &= M\{\min(\theta, \eta)\} + T_1 P\{\theta > \eta\} + T_2 P\{\theta \leq \eta\} = \\ &= \int_0^{\infty} (1 - G(t))(1 - F(t))dt + T_1 \int_0^{\infty} G(t)dF(t) + T_2 \int_0^{\infty} F(t)dG(t). \end{aligned} \quad (2.28)$$

После подстановки выражения из правой части (2.28), в уравнение (2.27) получим

$$p(x) = \frac{\int_0^{\infty} [1 - G(t)][1 - F(t + x)] dt}{\int_0^{\infty} [1 - G(t)][1 - F(t)]dt + T_1 \int_0^{\infty} G(t)dF(t) + T_2 \int_0^{\infty} F(t)dG}. \quad (2.29)$$

Так как числитель и знаменатель выражения из правой части (2.29) представлены интегралами, то математические преобразования для

упрощения громоздких выкладок проведем отдельно для числителя и знаменателя, а потом соберем вместе.

Используя формулу интегрирования по частям и свойства функции $G(t)$ представим (2.29) в виде:

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\infty} (1 - G(t))(1 - F(t + x))dt = \\
 & = \int_0^{\infty} (1 - F(t + x)) - G(t)(1 - F(t + x))dt = \\
 & = \int_0^{\infty} (1 - F(t + x))dt - \int_0^{\infty} G(t)(1 - F(t + x))dt = \\
 & = \left(\int_0^t [1 - F(t + x)]dt \right) G(t) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} G(t) d \left(\int_0^t [1 - F(t + x)]dt \right) = \\
 & = \int_0^{\infty} \left(\int_0^t [1 - F(t + x)] dt \right) dG(t). \tag{2.30}
 \end{aligned}$$

Тогда последнее выражение в равенствах (2.30), а следовательно, числитель в выражении (2.29), преобразуется к виду

$$\int_0^{\infty} \left(\int_0^t [1 - F(t + x)] dt \right) dG(t) = \int_0^{\infty} \omega(t, x) dG(t), \tag{2.31}$$

где

$$\omega(t, x) = \int_0^t [1 - F(t + x)] dt.$$

Интегрируем по частям знаменатель выражения, стоящего в правой части (2.29):

$$\int_0^{\infty} (1 - F(t))(1 - G(t))dt + T_1 \int_0^{\infty} G(t)dF(t) + T_2 \int_0^{\infty} F(t)dG(t) =$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\int_0^t [1 - F(t)] dt \right) G(t) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty G(t) d \left(\int_0^t [1 - F(t)] dt \right) + T_1 G(t) F(t) \Big|_0^\infty - \\
&\quad - T_1 \int_0^\infty F(t) dG(t) + T_2 \int_0^\infty F(t) dG(t). \tag{2.32}
\end{aligned}$$

Подставив $\omega(t, x)$ в (2.32), получим следующее:

$$\begin{aligned}
&\left(\int_0^t [1 - F(t)] dt \right) G(t) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty G(t) d \left(\int_0^t [1 - F(t)] dt \right) + T_1 G(t) F(t) \Big|_0^\infty - \\
&\quad - T_1 \int_0^\infty F(t) dG(t) + T_2 \int_0^\infty F(t) dG(t) = \\
&= \omega(t, 0) G(t) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty G(t) d \omega(t, 0) + T_1 + \int_0^\infty (T_2 - T_1) F(t) dG(t) = \\
&= \int_0^\infty \omega(t, 0) dG(t) + \int_0^\infty (T_1 + (T_2 - T_1) F(t)) dG(t) = \\
&= \int_0^\infty (\omega(t, 0) + T_1 + (T_2 - T_1) F(t)) dG(t). \tag{2.33}
\end{aligned}$$

Подставляя числитель из (2.31) и знаменатель из (2.33) в (2.29), получим выражение для $p(x)$:

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty \omega(t, x) dG(t)}{\int_0^\infty (\omega(t, 0) + T_1 + (T_2 - T_1) F(t)) dG(t)}, \tag{2.34}$$

где $\omega(t, x)$ определена в (2.31).

Обозначим:

$$\begin{aligned}
A(t) &= \omega(t, 0) > 0, \\
B(t) &= \omega(t, 0) + T_1 + (T_2 - T_1) F(t) > 0. \tag{2.35}
\end{aligned}$$

Тогда выражение для $p(x)$ можно представить как

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty A(t) dG(t)}{\int_0^\infty B(t) dG(t)}. \tag{2.36}$$

Следовательно, правая часть уравнения (2.36) является дробно-линейным функционалом относительно $G(t)$. Утверждение 2 доказано.

Далее нам нужно обеспечить максимум вероятности $p(x)$ за счет выбора $G(t)$. Для этого ее можно свести к задаче нахождения экстремума функции одного аргумента. Если предположить, что элемент будет ремонтироваться через постоянное время τ , тогда $G(t)$ можно представить в виде ступенчатого распределения:

$$G(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq \tau, \\ 1 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (2.37)$$

Исследования, проведенные в [9], показали, что распределение (2.37) в виде функции Хэвисайда обеспечивает максимум дробно-линейного функционала (2.36). Учитывая (2.37), получим выражение

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^\tau [1 - F(t + x)] dt}{\int_0^\tau [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau)}. \quad (2.38)$$

Утверждение 3. Величина оптимального интервала замены (ремонта) элемента, в котором функция $p(x, \tau)$ достигает наибольшего значения, определяется единственным образом с учетом следующих допущений:

- средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта T_2 больше средней длительности планового предупредительного ремонта или замены T_1 , то есть $T_2 > T_1$,

$$- \lambda'(t) > 0,$$

$$\text{где } \lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)},$$

- интервал безотказности x намного меньше среднего времени безотказной работы элемента T_0 , т. е. $x \ll T_0$, где T_0 – среднее время безотказной работы элемента.

Доказательство.

Воспользуемся формулой Лейбница дифференцирования по параметру:

$$\frac{d}{dy} \int_{\phi(y)}^{\omega(y)} f(x, y) dx = f(\omega(y), y) \omega'(y) - f(\phi(y), y) \phi'(y) + \int_{\phi(y)}^{\omega(y)} f'(x, y) dx.$$

Продифференцируем выражение (2.35) по τ и получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(x, \tau)}{\partial \tau} &= \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right] \times \right. \\ &\quad \times \left[\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau) \right] - \\ &\quad \left. - \left[\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau) \right) \right] \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right\} \times \\ &\quad \times \frac{1}{\left[\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau) \right]^2}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Так как

$$\begin{aligned} &\left(\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right) = \\ &= 1 - F(\tau + x) \frac{\tau}{\partial \tau} - ((1 - F(x)) * 0) + \int_0^{\tau} \frac{\partial}{\partial \tau} [1 - F(t + x)] dt = \\ &= 1 - F(\tau + x), \end{aligned} \quad (2.40)$$

а также

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau) \right) = \\ &= 1 - F(\tau) + (T_2 - T_1) \frac{dF(\tau)}{d(\tau)}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

то для поиска экстремума функции $p(x, \tau)$ приравняем выражение в фигурных скобках из (2.39) к 0 и, применяя (2.40) и (2.41), получим

$$\begin{aligned} &\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau) - F(\tau + x) \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt - F(\tau + x)T_1 - \\ &\quad - (T_2 - T_1)F(\tau)F(\tau + x) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right. \\
& \left. - F(\tau) \int_0^{\tau} (1 - F(t + x)) dt + (T_2 - T_1) \frac{dF(\tau)}{d\tau} \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right] \\
& = 0.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

После упрощений (2.42) найдем, что

$$\begin{aligned}
& (1 - F(\tau + x))T_1 = \\
& = (T_2 - T_1) \left[(1 - F(\tau + x))(-F(\tau)) - \frac{dF(\tau)}{d\tau} (1 - F(t + x)) dt \right] + \\
& + \int_0^{\tau} \left[1 - F(t) dt - F(\tau + x) \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt \right].
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Дальнейшие упрощения (2.43) приводят к следующему результату:

$$\begin{aligned}
& \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \\
& = \left[\frac{(F(\tau + x) - 1)F(\tau)}{1 - F(\tau + x)(1 - F(\tau))} + \frac{\partial F(\tau)}{1 - F(\tau)(1 - F(\tau + x))} \int_0^{\tau} (1 - F(t + x)) dt \right] * \\
& \quad * (1 - F(\tau)) + \\
& \quad + \frac{(-1)}{T_2 - T_1} \left[\frac{(1 - F(\tau + x))}{1 - F(\tau + x)} \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt \right] + \\
& \quad + \frac{(F(\tau) - 1)}{1 - F(\tau + x)} \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

После упрощений (2.44) окончательно получим:

$$\begin{aligned}
& \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \left[\frac{F(\tau + x) - 1}{1 - F(\tau)} F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt \right] \frac{1 - F(\tau)}{1 - F(\tau + x)} + \\
& + \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{1 - F(\tau)}{1 - F(\tau + x)} \int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt - \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt \right],
\end{aligned} \tag{2.45}$$

где

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}. \quad (2.46)$$

Уравнение (2.45) разрешимо, так как легко проверить, что оно обращается в верное равенство при $\tau = 0$ и при $\tau \rightarrow \infty$. Чтобы решить поставленную задачу, нужно из корней уравнения (2.45) найти такой, в котором функция $p(x, \tau)$ достигает наибольшего значения. Пусть τ_1, \dots, τ_n – корни уравнения (2.45). Оптимальное значение корня – это наименьший положительный корень уравнения (2.45), вследствие того, что $T_2 > T_1$ и $\lambda'(t) > 0$, а также функция $\max p(x, \tau_i), i = \overline{1, n}$, является монотонно убывающей по τ_i . Обозначим оптимальное значение корня τ_0 .

Допустим, что $x \ll T_0$. Среднее время безотказной работы элемента сложной технической системы T_0 вычисляется следующим образом:

$$T_0 = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt.$$

С учетом этого допущения (2.45) можно упростить.

Используем теорему Лагранжа о среднем:

$$1 - F(I + x) = 1 - F(t) + [1 - F(t)]' x = 1 - F(t) - f(t) x.$$

Тогда (2.38) можно представить следующим образом:

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt - xF(\tau)}{\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau)}. \quad (2.47)$$

Воспользуемся необходимым условием экстремума функции $p(x, \tau)$, для этого продифференцируем (2.47) по τ . После приравнивания результата дифференцирования к нулю получаем уравнение:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = -F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt - \frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} x \lambda(\tau). \quad (2.48)$$

Учтем ранее введенные допущения: $T_2 > T_1$ и $\lambda'(t) > 0$, а также то, что вследствие этих допущений, функция в правой части (2.48) монотонно

возрастает, значит наименьший корень – единственный. Следовательно, величина оптимального интервала замены (ремонта) элемента τ_0 , в котором функция $p(x, \tau)$ достигает наибольшего значения, определяется единственным образом.

Утверждение 3 доказано.

В процессе эксплуатации СТС, как правило, выполняется следующее соотношение: $T_1\lambda(\tau)x \ll 1$. С учетом этого допущения (2.48) можно представить следующим образом:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau) \int_0^\tau [1 - F(t)]dt - F(\tau). \quad (2.49)$$

В результате преобразований (2.49) можно представить в виде уравнения Трулава [9]:

$$\frac{T_1}{T_2 + x} = 1 - \frac{1}{1 - F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^\tau [1 - F(t)]dt}. \quad (2.50)$$

В результате решения уравнения (2.49) получается оптимальный интервал замены (ремонта) для каждого элемента СТС, [10, 16, 17] который обеспечивает экстремум функции (2.38) и, следовательно, максимум функционала (2.36). Таким образом, если произвести замену или ремонт элемента сложных технических систем через интервал времени τ_0 [10, 16, 17], то будет обеспечен максимум вероятности безотказной работы данного элемента от этого момента времени в течение интервала безотказности x .

Решение интегро-дифференциального уравнения (2.49) в аналитическом виде не представляется возможным. Следовательно, необходимо применение численных методов. Анализ различных численных методов решения уравнения (2.49) и выбор наиболее рационального из них будет произведен в параграфе 2.5.

2.5 Анализ различных численных методов решения интегро-дифференциальных уравнений математического метода вычисления вероятности безотказной работы сложной технической системы

Для нахождения величины оптимального значения интервала замен (ремонта) элемента необходимо решить интегро-дифференциальное уравнение (2.49) из параграфа 2.4. Это уравнение может быть решено с помощью различных численных методов. Одним из методов решения уравнения (2.49) является графический метод, основанный на построении графиков функции и определении точек их пересечения. Данный метод является весьма приближенным и имеет невысокую точность.

Для получения более высокой точности решения уравнения (2.49) необходимо использовать численный метод.

Задача численного интегрирования состоит в замене исходной подынтегральной функции $f(x)$, для которой трудно или невозможно записать первообразную в аналитическом виде, некоторой аппроксимирующей функцией $\varphi(x)$. Такой функцией обычно является полином разных степеней.

Для численного решения уравнения (2.49) необходимо выбрать оптимальный метод вычисления интегралов, входящих в это уравнение. Поставим в соответствие интегралу в правой части (2.49) квадратурную формулу:

$$\int_0^1 f(s) ds \approx \sum_{k=0}^m p_k f s_k, \quad (2.51)$$

где s – фиксированный аргумент,

p_k – весовые коэффициенты квадратурной формулы.

Общий вид квадратурной формулы:

$$I = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b \varphi(x) dx + R, \quad (2.52)$$

где $R = \int_a^b r(x) dx$ - априорная погрешность метода на интервале интегрирования,

$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(x)$ - сумма функций $\varphi_i(x)$,

$r(x)$ – априорная погрешность метода на отдельном шаге

интегрирования.

Для семейства методов Ньютона-Котеса можно записать общее выражение:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{n \cdot h}{C_n} \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^n c_{in} f(x_i), \quad (2.53)$$

где n – порядок метода Ньютона-Котеса, N – количество частичных отрезков, $h = \frac{x_j - x_{j-1}}{n}$, $C_n = \sum_{i=0}^n c_{in}$, $x_i = x_j + i * h$.

К методам Ньютона-Котеса относятся следующие методы: метод прямоугольников, метод трапеций, метод Симпсона.

Выведем формулу метода прямоугольников из анализа разложения функции $f(x)$ в ряд Тейлора вблизи некоторой точки $x=x_i$:

$$f(x)|_{x=x_i} = f(x_i) + (x - x_i) f'(x_i) + \frac{(x - x_i)^2}{2} f''(x_i). \quad (2.54)$$

Рассмотрим диапазон интегрирования от x_i до x_{i+h} , где h - шаг интегрирования:

$$\int_{x_i}^{x_i+h} f(x) dx = x f(x_i)|_{x_i}^{x_i+h} + \frac{(x-x_i)^2}{2} f'(x_i)|_{x_i}^{x_i+h} + \frac{(x-x_i)^3}{3 \cdot 2!} f''(x_i)|_{x_i}^{x_i+h}. \quad (2.55)$$

Получили формулу правых (или левых) прямоугольников и априорную оценку погрешности r на отдельном шаге интегрирования. Основной критерий, по которому судят о точности алгоритма – степень при величине шага в формуле априорной оценки погрешности.

В случае равного шага h на всем диапазоне интегрирования общая формула имеет вид:

$$\int_a^b f(x) dx = h \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i) + R. \quad (2.56)$$

Здесь n - число разбиений интервала интегрирования.

Оценка погрешности численного интегрирования методом прямоугольника:

$$r = \frac{h^3}{24} f''(x), R = \frac{h^2}{24} \int_a^b f''(x) dx. \quad (2.57)$$

Метод трапеций. Аппроксимация в этом методе осуществляется полиномом первой степени.

$$\int_{x_i}^{x_i+h} f(x) dx \approx \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_i + h)). \quad (2.58)$$

Метод Симпсона. Подинтегральная функция $f(x)$ заменяется интерполяционным полиномом второй степени $P(x)$ - параболой, проходящей через три узла.

Рассмотрим два шага интегрирования ($h = \text{const} = x_{i+1} - x_i$), то есть три узла x_0, x_1, x_2 , через которые проведем параболу, воспользовавшись уравнением Ньютона:

$$P(x) = f_0 + \frac{x - x_0}{h} (f_1 - f_0) + \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{2h^2} (f_0 - 2f_1 + f_2). \quad (2.59)$$

Пусть $z = x - x_0$, тогда:

$$\begin{aligned} P(z) &= f_0 + \frac{z}{h} (f_1 - f_0) + \frac{z(z - h)}{2h^2} (f_0 - 2f_1 + f_2) = \\ &= f_0 + \frac{z}{2h} (-3f_0 + 4f_1 - f_2) + \frac{z^2}{2h^2} (f_0 - 2f_1 + f_2). \end{aligned} \quad (2.60)$$

Теперь, воспользовавшись полученным соотношением, посчитаем интеграл по данному интервалу:

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_2} P(x) dx &= \int_0^{2h} P(z) dz \approx 2hf_0 + \frac{(2h)^2}{4h} (-3f_0 + 4f_1 - f_2) + \frac{(2h)^3}{6h^2} (f_0 - \\ &- 2f_1 + f_2) = 2hf_0 + h(-3f_0 + 4f_1 - f_2) + \frac{4h}{3} (f_0 - 4f_1 + f_2) = \\ &= \frac{h}{3} (6f_0 - 9f_0 + 12f_1 - 3f_2 + 4f_0 - 8f_1 + 4f_2). \end{aligned} \quad (2.61)$$

Далее получим:

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx \approx \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + f_2). \quad (2.62)$$

Проведем анализ значений интеграла для следующих шагов: $n_1=1000$, $n_2= 10000$, $n_3= 100000$, $n_4 =1000000$, $n_5 =10000000$.

Так как требуемая точность для данной задачи составляет 0,1 млн. тон, то для ее достижения достаточно посчитать интеграл на 4-м шаге:

$$|86007.2-86045.8|=38,6,$$

$$|86045.8-86049.7|=3,9,$$

$$|86049.7-86050|=0,3,$$

$$|86050-86050.1|=0,1.$$

Из проведенного анализа видно, что значение интеграла на 4-м шаге отличается от значения интеграла на 5-м шаге не более чем на 0,1 млн. тон.

Таблица 2.2 – Значения интеграла для следующих шагов

$n_1=1000$	$n_2= 10000$	$n_3= 100000$	$n_4 =1000000$	$n_5 =10000000$
86007.2	86045.8	86049.5	86049.6	86050.1
85988.2	86043.9	86049.6	86049.9	86050.1
86050.1	86050.1	86050.1	86050.1	86050.1
86168.2	86061.9	86051.3	86050.2	86050.1

Таким образом, посчитаем интеграл на 4-м шаге с помощью различных методов Ньютона-Котеса: метода прямоугольников, метода трапеций, метода парабол, метода Буля:

$$|86049.6-86049.9|=0,3,$$

$$|86049.9-86050.1|=0,2,$$

$$|86050.1-86050.2|=0,1.$$

Так как разница между методом Буля и методом парабол составляет не более чем 0,1 млн. тон, то для исследуемого уравнения оптимальным является вычисление интеграла в правой части уравнения методом Симпсона.

Применим метод Симпсона для вычисления интеграла в следующем уравнении:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau) \int_0^\tau [1 - F(t)] dt - F(\tau). \quad (2.63)$$

Для вычисления интеграла в уравнении (2.63) методом Симпсона построена блок-схема, представленная на рисунке 2.2.

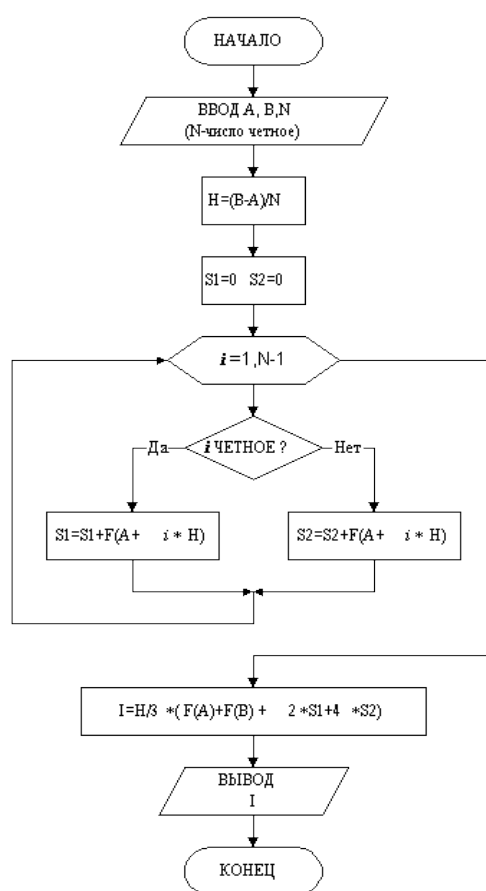


Рисунок 2.2- Блок-схема метода Симпсона

Интеграл в уравнении (2.63) представлен выражением:

$$\frac{h}{3} ([1 - F(0)] + 4 * [1 - F(1)] + [1 - F(2)]) . \quad (2.64)$$

Следовательно, проведенный анализ показал, что для (2.63) оптимальным будет вычисление интеграла в правой части уравнения методом Симпсона.

Суть метода заключается в приближении подынтегральной функции на отрезке $[a, b]$ интерполяционным многочленом второй степени $p_2(x)$:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b p_2(x)dx = \frac{b-a}{6} \left(f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right), \quad (2.65)$$

где $f(a), f(b)$ - значения функции на концах отрезка,

$f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ - значение функции в середине отрезка.

Таким образом решение интегро-дифференциального уравнения (2.49) производится с использованием метода Симпсона. Алгоритм решения интегро-дифференциального уравнения (2.49) с помощью метода Симпсона представлен в главе 4, а реализован в программном комплексе, изложенном в главе 5.

С помощью представленного алгоритма проведены расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов целого ряда эксплуатируемых в настоящее время сложных технических систем [10, 16, 17].

В результате решения полученного интегро-дифференциального уравнения (2.49) с помощью численного метода находится величина оптимального значения интервала замены (ремонта) для каждого элемента системы. Построенный вероятностный метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами позволит осуществлять замены или ремонты элементов в оптимальные моменты времени, обеспечивающие максимизацию вероятности безотказной работы сооружений при минимуме затрат на эксплуатацию [9, 10, 14, 19].

2.6 Схема управления техническим состоянием сложной технической системы

Надежность СТС, таких как искусственные сооружения на железных дорогах чрезвычайно важна, так как напрямую связана с обеспечением безопасности жизни пассажиров и грузов.

В соответствии с ГОСТ Р 54257-2010 [27] надежность строительного объекта определяется, как способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации, а расчетный срок службы - установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции. Следовательно, расчетный срок службы определяется априори, т. е. до начала эксплуатации, на основе среднестатистических данных. Поэтому элементы СТС заменяются или ремонтируются через **нормируемые межремонтные сроки**.

Для учета изменений эксплуатационных условий, таких как меняющаяся поездная нагрузка, непостоянная интенсивность движения, переменные климатические условия, с целью обеспечения требуемой надежности необходимо эксплуатировать СТС, такие как искусственные сооружения на железных дорогах по **фактическому техническому состоянию**.

Для того чтобы определить срок службы и другие показатели надежности СТС не по нормируемым межремонтным срокам, а по фактическому техническому состоянию, необходимо построить вероятностный метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, такой как искусственное сооружение. Вероятностный метод

управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами позволит спрогнозировать срок службы СТС с обеспечением заданной вероятности безотказной работы. Для эффективной эксплуатации СТС, такой как искусственное сооружение необходимо осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностному методу с учетом технического фактического состояния этих элементов.

На основании проведенных уполномоченными организациями обследований на основе методики АСУ ИССО вычисляются вероятности безотказной работы элементов СТС, из нормативных документов, методик и экспертных оценок определяются такие исходные данные как время эксплуатации, например для моста это кол-во миллионов тонн прошедшей нагрузки брутто, а также времена T_1 , T_2 , x . Все эти данные поступают на вход в схему управления техническим состоянием СТС.

Управление техническим состоянием СТС состоит из следующих этапов:

– На первом этапе на основе исходных данных производится расчет параметров закона распределения Вейбулла для каждого элемента СТС.

– На следующем этапе производится расчет времени отказа всей системы. По найденным функциям распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами для каждого элемента $F(t)$ и заданной классификации элементов, с помощью рекуррентного метода рассчитывается вероятность безотказной работы СТС в заданный момент времени. По найденной зависимости можно рассчитать момент времени τ_c при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, что позволяет рассчитать срок эксплуатации всей системы.

– На следующем этапе по заданным исходным данным производится расчет оптимального интервала для каждого элемента.

– Затем производится учет слабых звеньев. Замены или ремонты слабых звеньев производятся раньше рассчитанного оптимального интервала с целью обеспечения надежности всей системы в целом. В результате получается новый набор оптимальных интервалов замен (ремонтов) для всех элементов СТС.

– На следующем этапе с помощью генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект получается оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) для всех элементов СТС, обеспечивающий минимум затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

– На последнем этапе рассчитывается срок эксплуатации СТС и принимается решение о сокращении или продлении времени ее эксплуатации до очередного ремонта.

Поскольку величина вероятности безотказной работы в заданное время СТС, такой как искусственное сооружение меньше, чем величина вероятности безотказной работы в это же время любого из его элементов, необходимо с помощью вероятностного метода рассчитывать, то есть прогнозировать, срок эксплуатации всей СТС, такой как искусственное сооружение.

Расчет надежности всей СТС, такой как искусственное сооружение можно производить по построенному **рекуррентному методу**, изложенному в параграфе 2.3.

Для СТС, например такой как железнодорожный мост, вероятность безотказной работы элементов, учитывая высокие требования к безопасности эксплуатации, не должна опускаться ниже P_0 . Поэтому для всей СТС необходимо определить момент времени эксплуатации или, что тоже самое, например, для железнодорожного моста, прошедшую поездную нагрузку, когда вероятность безотказной работы СТС достигает P_0 .

Поскольку отказ всей СТС наступает раньше, чем отказ ее элементов, в первую очередь необходимо заменить те элементы, срок замены (ремонта)

которых наступает раньше, чем у других.

На основе выбранного для каждого элемента закона распределения с рассчитываемыми параметрами функций отказов, с помощью рекуррентного метода рассчитывается вероятность безотказной работы всей системы в заданный момент времени. Следовательно, можно получить зависимость вероятности безотказной работы всей СТС от времени эксплуатации. По найденной зависимости рассчитывается момент времени τ_c при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы P_0 .

Для того чтобы эксплуатировать СТС по критерию минимума затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности необходимо осуществлять замены (ремонт) отдельных элементов СТС, количество которых обозначим через n , через оптимальные интервалы $\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$, рассчитанные с помощью метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Для того чтобы определить срок замены (ремонта) всех элементов СТС необходимо использовать алгоритм расчета оптимального интервала замен (ремонтов) [10, 14, 19]. Далее из всех оптимальных интервалов нужно выбрать наименьший интервал, то есть выбрать элемент, который необходимо заменять раньше всех элементов.

Для расчета методом управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами необходимо представить искусственное сооружение как СТС, состоящую из большого количества взаимосвязанных элементов, что можно сделать следующим образом.

Для каждого элемента задается своя функция вероятности безотказной работы следующим способом:

— Функция вероятности безотказной работы выбирается согласно принципам, изложенным в статье [12]. Оптимальным выбором, как изложено в этой статье, является функция распределения Вейбулла, для которой нужно

задать два параметра. При отсутствии данных обследования параметры функции распределения Вейбулла подбираются согласно теории, изложенной в этой же статье.

— По данным обследования рассчитываются параметры выбранной функции распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами для каждого элемента металлического пролетного строения.

Для определения параметров функции распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами необходимо провести обследования СТС, такой как искусственное сооружение на железной дороге. При проведении обследования для каждого элемента СТС рассчитывается бальная оценка его технического состояния с помощью «Инструкции по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации» [52]. Далее бальная оценка может быть переведена в меру повреждения, по методике изложенной в пункте 2.2.2.

По полученной таким способом после проведения одного обследования вероятности безотказной работы и известной прошедшей нагрузки к моменту этого обследования вычисляется один из параметров функции надежности. При проведении двух обследований можно вычислить оба параметра функции вероятности безотказной работы. При проведении последующих обследований параметры функции распределения Вейбулла уточняются. Таким образом, для каждого элемента СТС подбираются и, впоследствии, уточняются свои параметры функции распределения Вейбулла.

По найденным таким образом функциям вероятности безотказной работы для каждого элемента, с помощью рекуррентного метода [5] рассчитывается вероятность безотказной работы всего сооружения в заданный момент времени или, что тоже самое, при заданном значении пропущенной нагрузки. Следовательно, можно получить зависимость вероятности безотказной работы всего СТС от прошедшей нагрузки. По найденной зависимости можно рассчитать момент времени τ_c , при котором будет

достигнут критический уровень вероятности безотказной работы P_0 .

Рассмотрим металлическое пролетное строение СТС, в котором количество элементов обозначим через n . Для того чтобы эксплуатировать СТС, такую как искусственное сооружение по критерию минимума затрат на эксплуатацию при максимуме надежности необходимо осуществлять замены (ремонт) отдельных элементов СТС через оптимальные интервалы $\tau_1, \tau_i, \dots, \tau_n$, рассчитанные с помощью метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами [10, 19].

Оптимальный интервал замены (ремонта) зависит от времени, в течение которого элемент должен гарантированно проработать для того, чтобы за это время осуществить его ремонт или замену с учетом возможных задержек, т. е. от длительности интервала безотказности x .

Для любого i -го элемента СТС справедливо следующее неравенство:

$$\tau_i + x_i > \tau_c, \quad (2.66)$$

где $\tau_i, i = 1, \dots, n$ – оптимальный интервал для i -го элемента,

τ_c – интервал замены (ремонта) СТС,

x_i – интервал безотказности элемента,

n – количество элементов в СТС.

Это неравенство представлено графически на рисунке 2.3.

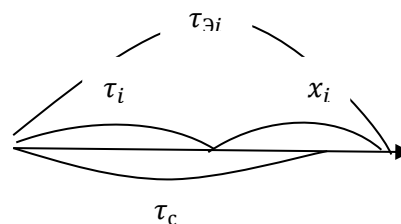


Рисунок 2.3 - Соотношение интервалов $\tau_{\Sigma i}, \tau_i, x_i, \tau_c$

Для того чтобы СТС соответствовала требованиям надежности необходимо начать заменять элементы СТС с наименьшими оптимальными интервалами τ_{min} и, следовательно, с наименьшим интервалом $\tau_{\Sigma min}$, равным сумме τ_{min} и x_{min} для таких элементов, за интервал x до момента времени,

когда необходимо заменить всю СТС, т.е. оптимальный интервал для таких элементов уменьшается на время равное $\tau = \tau_{\varepsilon min} - \tau_c$. Таким образом,

$$\tau_{min} - \tau = \tau_{\varepsilon min} - \tau \leq \tau_c, \quad (2.67)$$

где τ_{min} – наименьший оптимальный интервал для такого элемента,

$\tau_{\varepsilon min}$ – сумма оптимального интервала τ_{min} и интервала безотказности X_{min} для такого элемента,

τ_c – интервал замены (ремонта) СТС.

После того как заменены элементы с минимальным оптимальным временем необходимо сделать перерасчет надежности всей СТС и узнать, как изменилось время эксплуатации всей СТС.

Таким образом оптимальная стратегия эксплуатации СТС, созданная в данной работе, базируется на использовании двух математических методов: математическом методе управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, с помощью которого можно вычислить времена замен (ремонтов) для всех элементов СТС [16, 64], и рекуррентном методе расчета надежности на основе классификации элементов СТС, с помощью которого можно вычислить вероятность безотказной работы всей СТС в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этого сооружения в предшествующие моменты времени, а также с учетом износа каждого элемента СТС к заданному моменту времени [11].

2.7 Расчет показателей технического состояния сложной технической системы и их прогнозирование

В транспортной стратегии Российской Федерации одним из ведущих и организующих видов является железнодорожный транспорт. Протяженность путей сообщения транспортной системы России по состоянию на начало 2012 года составляла 86 тыс. км железных дорог общего пользования и 38 тыс. км

путей промышленного железнодорожного транспорта. Объем перевозок грузов и пассажиров в 2012 составил для железнодорожного транспорта общего пользования - 1274,7 млн. т., для железнодорожного промышленного - 3441,8 млн. т [11]. К 2030 году прогнозируется существенное увеличение перевозок для железнодорожного транспорта общего пользования - до 1750,6 млн. т., для железнодорожного промышленного до 5574,7 млн. т., что составляет около 67% перевозок всеми видами транспорта в нашей стране [11]. Эти данные подтверждают, что в социально-экономическом развитии страны железнодорожный транспорт играет очень важную роль. Одной из целей транспортной стратегии Российской Федерации является повышение уровня безопасности транспортной системы и надежности искусственных сооружений [11]. Поэтому к железнодорожному транспорту и искусственным сооружениям на железных дорогах предъявляются особенно высокие требования по безопасности и надежности.

Термин «искусственные сооружения» возник в связи со значительным превышением трудности их строительства по сравнению со строительством основного полотна железной дороги. Искусственные сооружения представлены широкой номенклатурой и обеспечивают возможность пересечения железной дорогой водных преград, других железнодорожных линий, автодорог, глубоких ущелий, горных хребтов, застроенных городских территорий, а также обеспечивает безопасный переход людей через пути и устойчивость земляного полотна в сложных геологических и гидрологических условиях.

Основными требованиями при проектировании и строительстве объектов на железных дорогах, в том числе искусственных сооружений, являются требования долговечности и надежности.

Долговечность и надежность искусственных сооружений зависит от следующих основных факторов: степени совершенства конструкции и применяемых технических и технологических решений, уровня и качества строительно-монтажных работ, применяемого оборудования и материалов, а также уровня эксплуатации искусственных сооружений.

Наиболее распространенными видами искусственных сооружений являются мосты и водопропускные трубы, укладываемые под насыпями на небольших водотоках и суходолах для пропуска талых и ливневых вод.

Мосты весьма разнообразны по уровню проезда, пропускаемой нагрузке, назначению, виду применяемых материалов для пролетного строения, ширине проезжей части, типу опор и пролетных строений, длине и статической схеме.

К настоящему моменту на железных дорогах России большое количество искусственных сооружений эксплуатируется в течение длительного времени. При исследовании современного состояния сложных технических систем, например искусственных сооружений, необходимо учитывать 3 фактора: во-первых, искусственное сооружение рассчитывается с учетом необходимости замены (ремонта) в процессе эксплуатации, во-вторых, к настоящему времени большинство искусственных сооружений имеют длительные сроки эксплуатации, а элементы этих искусственных сооружений близки к исчерпанию своего ресурса, в-третьих, искусственные сооружения, проектировавшиеся несколько десятков, а некоторые и более сотни лет назад были рассчитаны под другую нагрузку. Перечисленные факторы приводят к необходимости проводить исследования с целью прогноза технического состояния искусственного сооружения, определения времени замен или ремонтов его элементов с учетом меняющейся нагрузки и фактического технического состояния, и тем самым осуществлять управление его техническим состоянием в процессе эксплуатации.

Для того чтобы обеспечить максимальную надежность искусственного сооружения при условии минимальных затрат на его эксплуатацию необходимо производить замены и ремонты в соответствии с методом управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. Для этого необходимо рассчитывать показатели технического состояния, такие как вероятности безотказной работы и меры повреждения разнородных элементов моста в зависимости от срока их эксплуатации [11].

Исследования, которые упоминались выше, проводились для определенных типов поездов, актуальных для того времени. Для новых поколений поездов зависимости меры повреждения от нагрузки существенно изменились, что необходимо учитывать в расчетах.

Испытания крупногабаритных сварных образцов из сталей, используемых для строительства мостов, показали, что характер накопления усталостных повреждений существенно зависит от характера нагружения [19, 11]. При неоднородном режиме нагружения наблюдается постепенное увеличение напряжений циклов (что имеет место в мостовых конструкциях, вследствие роста нагрузок в процессе эксплуатации), а характер накопления повреждений близок к линейному. Поэтому в расчетах на выносливость применяется гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений, позволяющая упростить расчеты.

Для исследования меры повреждения СТС, таких как искусственные сооружения от нагрузки и анализа вероятности безотказной работы этих сооружений рассмотрим три типа поездов. Примем в качестве поезда I типа - поезд, состоящий из локомотива ВЛ-80 с 8 осями с нагрузкой 24 т/ось и состава из 8-осных грузовых вагонов с погонной нагрузкой 6,5 т/м, эксплуатировавшиеся в 60-е и 70-е годы XX века. В качестве поезда II типа рассмотрим поезд, состоящий из локомотива ВЛ-83 с 8 осями с нагрузкой 27 т/ось, и состава из 8-осных вагонов с погонной нагрузкой 10,5 т/м, эксплуатирующиеся в 70-е и 90-е годы прошлого века. В качестве поезда III типа примем поезд, состоящий из локомотива с 8 осями с нагрузкой 30 т/ось, и состава из 8-осных вагонов с погонной нагрузкой 27 т/м, эксплуатирующиеся в настоящее время [11].

Для любого типа поездов среднее количество вагонов Z_B вычисляется по формуле:

$$Z_B = \frac{L_{\text{проп}}}{l_B}, \quad (2.68)$$

где $L_{\text{проп}}$ — длина приемно-отправочных путей,

l_B — длина вагона по осям сцепления автосцепок.

Нагрузка от одного поезда P_{Π} определяется следующим образом:

$$P_{\Pi} = K_0 P_{ол} + P_{пв} l_B Z_B, \quad (2.69)$$

где K_0 — количество осей у одного локомотива,

$P_{ол}$ — нагрузка, приходящаяся на одну ось локомотива,

$P_{пв}$ — погонная нагрузка,

Z_B — количество вагонов,

l_B — длина вагона по осям сцепления автосцепок.

Для определения средней нагрузки на ось для поезда $P_{со}$ воспользуемся формулой:

$$P_{со} = \frac{P_{\Pi}}{(K_{ол} + K_{оп} Z_B)}, \quad (2.70)$$

где P_{Π} — нагрузка от одного поезда,

$K_{ол}$ — количество осей у локомотива,

$K_{оп}$ — количество осей у вагона,

Z_B — количество вагонов.

Отношение нагрузки на ось поезда II типа к нагрузке на ось поезда I типа $C_{н II-I}$ определяется формулой:

$$C_{н II-I} = \frac{P_{соII}}{P_{соI}}, \quad (2.71)$$

где $P_{соII}$ — нагрузка на ось поезда II типа,

$P_{соI}$ — нагрузка на ось поезда I типа.

Отношение нагрузки на ось поезда III типа к нагрузке на ось поезда II типа $C_{н III-II}$:

$$C_{н III-II} = \frac{P_{соIII}}{P_{соII}}, \quad (2.72)$$

где $P_{соIII}$ — нагрузка на ось поезда III типа,

$P_{соII}$ — нагрузка на ось поезда II типа.

Элементы СТС, такой как искусственное сооружение, имеют разные сроки эксплуатации вследствие неравномерности распределения нагрузки, особенности их конструкции, несовершенства строительных технологий и т. д.

Рассмотрим один из элементов СТС, такой как искусственное сооружение, а именно элемент с наименьшим интервалом безотказной работы, то есть являющийся самым слабым звеном всей системы.

Для определения меры повреждения элемента необходимо знать меру повреждения $v_{он}$, при которой наступает его предельное состояние, т.е. такое состояние, при котором элемент СТС, такой как искусственное сооружение перестаёт удовлетворять эксплуатационным требованиям, то есть либо теряет способность сопротивляться внешним воздействиям, либо получает недопустимую деформацию или местное повреждение. Это предельное состояние должно соответствовать заданной вероятности безотказной работы. Для того чтобы определить значение $v_{он}$ необходимо знать зависимость вероятности безотказной работы от меры повреждения, относящейся к определенному типу поезду.

В Московском государственном университете путей сообщения (МИИТе) имеется обширная база данных по мостам, пролетные строения которых выполнены из металла. С целью определения долговечности элементов мостов в МИИТе были обследованы около 100 раскосов главных ферм пролетных строений железнодорожных мостов, изготовленных из литого железа и стали марки Ст3 по расчетным нормам 1896, 1907, 1931 г.г. и эксплуатировавшихся в различных районах страны [11].

В ходе исследований элементов металлических пролетных строений получены данные, позволяющие определить меру повреждения при которой наступил отказ [11]. На основе обработанных статистических данных строится гистограмма (рисунок 2.4) зависимости частоты отказа от меры повреждения следующим образом. По оси абсцисс откладываются значения меры повреждения, при которой наступил отказ, а по оси ординат - отношение количества элементов, в которых наступил отказ, ко всем элементам, выраженное в процентах.

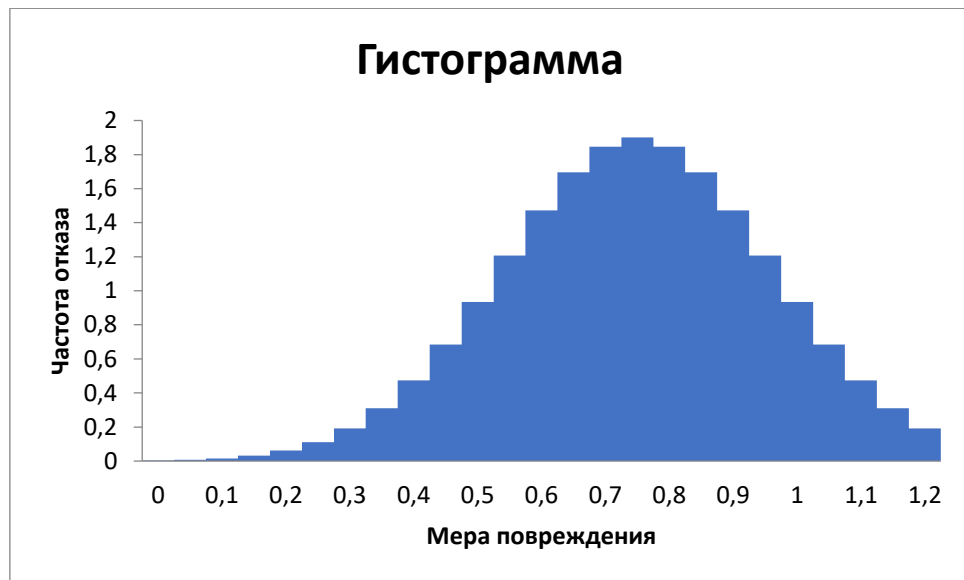


Рисунок 2.4 - Гистограмма зависимости частоты отказа от меры повреждения

Данная гистограмма аппроксимируется плотностью вероятности $f(v)$, построенной по нормальному закону с математическим ожиданием $m_v = 0,75$ и $\sigma_v = 0,21$ [11, 41, 68] (рисунок 2.5).

$$F(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-(v-m)^2}}{2\sigma^2}, \quad (2.73)$$

где m - математическое ожидание меры повреждения, при которой наступил отказ,

σ - стандартное отклонение меры повреждения, при котором наступил отказ.



Рисунок 2.5 - Плотность вероятности

На основании этих данных построена зависимость вероятности безотказной работы от меры повреждения v_0 .

В таблице, приведенной в монографии [69], представлены значения v_0 и соответствующая им вероятность безотказной работы.

Согласно методике оценки усталостной долговечности элементов металлических пролетных строений железнодорожных мостов В. О. Осипова [69] оценку надежности элемента можно получить, сравнивая расчетную меру повреждения v с заданной мерой повреждения $v_{он}$, которая должна удовлетворять соотношению: $v_{он} \leq 0,3$, что соответствует вероятности безотказной работы больше или равной 0,98

Мера повреждения от одного стандартного поезда I и II типов v' выражается следующим образом:

$$v' = \frac{v_{он} - v_{нак}}{N}, \quad (2.74)$$

где $v_{он}$ — мера повреждения, обеспечивающая заданную надежность, которая берется из таблицы, приведенной в монографии [69],

$v_{нак}$ — мера накопленных повреждений от прошедшей нагрузки, которая берется из таблиц, приведенных в монографии [69],

N — остаточный ресурс от прошедшей нагрузки.

Мера повреждения элемента от поезда III типа v'_{III} вычисляется с помощью формулы:

$$v'_{III} = (v'_{II} - v'_I) C_{н III-II} C_{н II-I} + v'_I, \quad (2.75)$$

где v'_{II} — мера повреждения от поезда II типа,

v'_I — мера повреждения от поезда I типа,

$C_{н III-II}$ — отношение нагрузки на ось поезда III типа к нагрузке на ось поезда II типа,

$C_{н II-I}$ — отношение нагрузки на ось поезда II типа к нагрузке на ось поезда I типа.

В качестве стандартного поезда примем один из трех типов поездов перечисленных выше.

Мера повреждения от 1 тонны стандартного поезда v'_T :

$$v'_T = \frac{v'}{P_{\Pi}}, \quad (2.76)$$

где v' — мера повреждения от одного стандартного поезда,

P_{Π} — нагрузка от одного стандартного поезда.

Общий подход к управлению техническим состоянием СТС, таких как искусственное сооружение базируется на нескольких математических методах:

– математический метод расчета надежности СТС с помощью рекуррентного метода на основе классификации элементов;

– математический метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС позволяет определить техническое состояние всей СТС. Так же данный метод позволяет спрогнозировать техническое состояние всей СТС и определить время, при наступлении которого вероятность безотказной работы сооружения опускается ниже допустимого предела.

Для того чтобы продлить работу СТС, и при этом чтобы эксплуатация была экономически эффективна, необходимо рассчитать оптимальный интервал замен (ремонт) для всех элементов СТС. Элемент с наименьшим оптимальным интервалом заменяется самым первым. Далее опять рассчитывается надежность СТС, в алгоритм вводится данные замененного элемента, таким образом время, когда вероятность безотказной работы снижается ниже допустимого предела меняется.

Такой подход позволит не только выявить состояние СТС в заданный момент, но и спрогнозировать его на последующий период эксплуатации и, следовательно, построить стратегию на весь период эксплуатации.

2.8 Прогнозирование износа металлических пролетных строений железнодорожных мостов

В настоящее время периодичность замен или ремонтов элементов искусственных сооружений на железных дорогах определяется на основании среднестатистических данных. Нормативные сроки, определенные на основании этих данных, представлены в документе «Технические условия на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России» [50]. Согласно этому документу, замена металлических пролетных строений с опорными частями и самих опор происходит с периодичностью 50-60 лет, замена поврежденных элементов с постановкой их на высокопрочные болты и с заменой дефектных заклепок высокопрочными болтами, а также замена элементов опорных частей — с периодичностью 25-30 лет.

Таким образом, нормативный (проектный) срок службы пролетных строений проектируемых мостов определяется на основе среднестатистических данных для различных конструкций моста. Однако, реальные параметры материалов отличаются от среднестатистических, в элементах конструкции искусственных сооружения имеются дефекты изготовления, допускаются отступления от требуемой технологии их создания, реальные климатические условия эксплуатации отличаются от заданных и т. д. Таким образом, фактическое поведение конструкций в действительных условиях эксплуатации при реально действующих внешних нагрузках и природно-климатических факторах отличается от расчетной модели.

Следовательно, от управления техническим состоянием моста на основе нормируемых межремонтных сроков необходимо переходить к управлению его техническим состоянием по фактическому состоянию [70]. Такой подход позволяет с достаточной точностью спрогнозировать общее состояние моста, а также состояние всех его элементов в любой момент времени после ввода моста в эксплуатацию. Таким образом, появляется возможность составить

график основных работ по поддержанию моста в работоспособном состоянии, опираясь не на усредненные нормы, а на фактическое, т. е. реальное, состояние данного моста. Следствием чего будет являться повышение надежности моста в целом, его отдельных элементов, а также существенное снижение затрат на эксплуатацию. В современных экономических условиях такой подход позволит принимать своевременные оптимальные решения по управлению техническим состоянием искусственных сооружений в соответствии с критерием «надежность – затраты» и может дать большой экономический эффект, т.е. минимизировать затраты на эксплуатацию, при условии обеспечения заданной надежности.

Для оценки фактического технического состояния моста построим математическую модель износа искусственного сооружения. Для получения приведенных оценок износа была используем методику, изложенную в нормативном документе «Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации» [52]. Износ исследуемого искусственного сооружения рассчитывается в форме приведенных балльных оценок.

Приведенные балльные оценки состояния K_{np}^{cost} искусственных сооружений определяют вычитанием из базовых балльных оценок соответствующих поправок, учитывающих категорию дефекта и их количество, по следующей формуле:

$$K_{np}^{cost} = K_{баз}^{cost} - (n_I \alpha_I + n_{II} \alpha_{II} + n_{III} \alpha_{III}),$$

где $K_{баз}^{cost}$ – базовая относительная оценка состояния сооружения, определяемая дефектом наибольшей категории, определенной по приложению 1 [52], из тех, которые обнаружены при обследовании искусственного сооружения;

n_I, n_{II}, n_{III} – количество дефектов соответственно I, II, и III категорий без учета одного дефекта, сформировавшего базовую оценку;

$\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ – коэффициенты, учитывающие категорию дефектов, соответственно для I, II, и III категорий, определенные по таблице П2.1 [52].

Все искусственные сооружения согласно методике, приведенной в [52], разделяются по наличию дефектов на четыре категории:

1. категория – дефекты отсутствуют;
2. категория – имеются мелкие дефекты, не оказывающие влияния на безопасность;
3. категория – имеются дефекты, развитие которых создаст угрозу безопасности;
4. категория – имеются серьезные дефекты, оказывающие влияние на безопасность и требующие особых условий эксплуатации вплоть до введения ограничений.

Для построения математической модели износа искусственного сооружения необходимо задать функцию износа, которая соответствует функции отказа из теории надежности.

Для выбора функции отказа необходимо рассмотреть различные законы распределения и выбрать из них такой, чтобы модель износа, построенная на его основе, в наибольшей степени соответствовала фактической эксплуатации такого рода объектов в реальных условиях.

Для построения функции отказа были рассмотрены следующие типичные законы распределения: нормальное распределение, гамма-распределение, логарифмически-нормальное распределение, распределение Вейбулла, экспоненциальное распределение [66].

На основании проведенного анализа из всех рассмотренных законов распределения в качестве оптимального был выбран закон Вейбулла, так как кривая функции распределения в законе Вейбулла в наибольшей степени соответствует кривой износа в искусственных сооружениях, в частности, быстрее растет после прохождения точки среднего времени функционирования элемента, чем до этой точки.

Зависимость износа от времени будем описывать функцией распределения Вейбулла $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tilde{\beta}}\right)^{\tilde{\alpha}}}$, где $\tilde{\alpha}$ – параметр формы и $\tilde{\beta}$ –

масштабный параметр. Найдем точку перегиба графика указанной функции распределения. Для этого продифференцируем функцию распределения дважды по t , приравняем полученный результат к нулю и получим абсциссу точки перегиба графика функции распределения:

$$t = \tilde{\beta} \left(\frac{\tilde{\alpha} - 1}{\tilde{\alpha}} \right)^{\frac{1}{\tilde{\alpha}}}. \quad (2.77)$$

Подставив абсциссу точки перегиба в функцию износа, получим значение функции распределения в точке перегиба:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\tilde{\alpha}-1}{\tilde{\alpha}}\right)}. \quad (2.78)$$

Проведем через найденную точку перегиба графика функции распределения прямую параллельную оси абсцисс. Ее уравнение будет иметь вид:

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{\tilde{\alpha}-1}{\tilde{\alpha}}\right)}. \quad (2.79)$$

Будем считать, что при найденном значении износа $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\tilde{\alpha}-1}{\tilde{\alpha}}\right)}$ в элементе искусственного сооружения наступает отказ. Полученные формулы позволяют вычислять момент отказа при известных коэффициентах $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$. При этом указанные коэффициенты определяются на основе обследования, т. е. анализа фактического технического состояния.

Данные обследований искусственных сооружений были предоставлены дорожными центрами диагностики при участии мостовых мастеров путевых частей.

Таким образом, предлагаемая модель прогнозирования износа позволяет обосновано принимать решение о продлении ресурса искусственных сооружений, т. е. сокращении эксплуатационных затрат, при условии обеспечения заданной надежности. Следовательно, применение предлагаемой модели позволит эксплуатировать искусственные сооружения по критерию – «надежность – затраты», т. е. обеспечить максимум надежности при условии минимума затрат.

3 ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИРОВАННОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ

3.1 Применение адаптированного генетического алгоритма

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы» правительством Российской Федерации утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [71].

Одним из основных направлений развития цифровой экономики является повсеместное внедрение технологии искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект можно определить, как технологию создания интеллектуальных компьютерных программ, которые способны выполнять творческие функции человека.

Сейчас к искусственному интеллекту относят алгоритмы и системы, которые могут решать некоторые задачи подобно человеку.

В настоящее время искусственный интеллект проникает во все сферы жизни общества, в том числе в сферу транспорта.

Генеральный директор — председатель правления ОАО «Российские железные дороги» Белозёров О. В. на «Гайдаровского форума – 2018» отметил: «В компании реализуется научно-технический проект «Цифровая железная дорога» (в его рамках осуществляется ряд под проектов по определённым направлениям), который даёт как экономию ресурсов, так и удобство для клиентов [71]. Применение искусственного интеллекта позволит более точно прогнозировать объёмы и параметры работы».

В параграфе 2.4 настоящей работы построен математический метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. Таким образом, на уровне элементов искусственных сооружений оптимизация проведена,

однако требуется проведение оптимизации на уровне всего сооружения. Для этого могут быть применены различные методы, в том числе генетический алгоритм. Выбор метода оптимизации будет произведен в следующем пункте.

3.2 Выбор метода оптимизации

Существуют различные методы оптимизации:

- методы нулевого порядка;
- методы первого порядка;
- методы второго порядка.

К методам нулевого порядка относятся следующие методы:

- метод локальных вариаций;
- метод случайного поиска;
- метод Пауэлла.

К недостаткам данных методов относится слабое математическое обоснование, в частности, отсутствие доказательств сходимости, а также практическая невозможность поиска оптимального решения с заданной точностью.

К методам первого порядка относятся следующие методы:

- метод наискорейшего спуска;
- метод сопряженных градиентов;
- метод случайного спуска.

Процесс наискорейшего спуска обычно быстро сходится вдали от точки экстремума и медленно в районе экстремума. Поэтому метод наискорейшего спуска нередко используют в комбинации с другими алгоритмами.

К методам второго порядка относятся следующие методы:

- метод Ньютона;
- метод Марквардта.

Поиск оптимального решения основан на сравнении значений целевой функции $f(x)$ в достаточно большом числе точек, выбранных, вообще говоря, случайным образом.

Стохастические методы так же применяют для поиска оптимального решения. Данные методы имеют низкую скорость сходимости.

Таким образом, все рассмотренные методы в силу своих недостатков не подходят для решения задачи оптимизации затрат на эксплуатацию СТС.

Модели эксплуатации СТС по своей сути, имеют вероятностный характер, так как все показатели надежности СТС определяются с помощью вероятностных оценок. В более сложных стохастических моделях эксплуатации времена замен или ремонтов имеют не точечный, а интервальный характер.

Интервалы располагаются случайным образом и могут накладываться друг на друга, в том числе и многократно. Усложняется задача оптимизации и становится практически невозможным применение стандартных методов поиска оптимального решения, что является первым существенным аргументом в пользу использования алгоритмов искусственного интеллекта при решении задач оптимизации эксплуатации СТС. Кроме того, СТС могут содержать очень большое число элементов, т.е. сотни тысяч и более. При таком огромном количестве элементов стандартные методы поиска оптимального решения сталкиваются с большими трудностями, как теоретическими, так и вычислительными. Это является вторым существенным аргументом для применения генетических алгоритмов, например, методов группового учета аргументов, в том числе алгоритмов массовой селекции. Таким образом, в данной постановке задачи оптимизации времен замен или ремонтов элементов СТС за все время эксплуатации применение генетических алгоритмов может оказаться в некоторых случаях единственно возможным, а в большинстве случаев - наиболее эффективным решением для построения оптимальной схемы эксплуатации СТС с целью достижения максимального

экономического эффекта при условии обеспечения заданного уровня надежности.

Поэтому для решения задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект применен адаптированный генетический алгоритм.

3.2 Постановка задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект

Рассмотрим СТС, состоящую из большого числа разных элементов. В ходе ее эксплуатации требуется эффективно заменять и ремонтировать исчерпавшие ресурс элементы для обеспечения безотказности работы этой СТС.

Первая часть задачи состоит в нахождении совокупности оптимальных времен замен (ремонтов) каждого из элементов СТС методом, изложенном в пункте 2.4.2, т.е. поэлементной оптимизации.

На основании метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющего вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента, изложенного в пункте 2.4.2 и рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов СТС, такой, как искусственное сооружение, изложенного в параграфе 2.3, а также алгоритмов, построенных на их основе, изложенных в главе 4, находится оптимальное время замены (ремонта) для каждого отдельного элемента СТС. Будем считать, что эти оптимальные времена замен (ремонтов) элементов уже найдены, т.е. первая часть задачи решена. Рассмотрим решение второй части задачи эффективных замен или ремонтов элементов СТС.

Вторая часть задачи состоит в оптимизации имеющейся совокупности оптимальных интервалов времен замен (ремонтов) элементов, полученных

при решении первой части задачи, т.е. в результате поэлементной оптимизации. Во второй части задачи требуется оптимизировать имеющуюся совокупность интервалов и тем самым построить оптимальную схему эксплуатации СТС в целом. Задача оптимизации эксплуатации СТС за счет эффективных замен ее элементов решается с помощью адаптированного генетического алгоритма и ставится следующим образом [15, 17, 23, 25].

Пусть: $\bar{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)$ - набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС, где n - количество элементов СТС;

$\bar{\theta} = (\bar{\tau}_1, \dots, \bar{\tau}_m)$ - популяция решений, т.е. совокупность наборов интервалов, где m – количество наборов в популяции решений;

$\Phi(\bar{\theta}) = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m F(\bar{\tau}_l)$ - функция приспособленности популяции решений;

$\Psi(\bar{\tau}_l) = Z_э(\bar{\tau}_l) + Z_с(\bar{\tau}_l) + Z_в(\bar{\tau}_l)$ - функция приспособленности l -го набора решений, $l=1, m$,

где $Z_э(\bar{\tau})$, $Z_с(\bar{\tau})$, $Z_в(\bar{\tau})$ - стоимости и затраты из (2.1).

Пусть заданы: $\bar{\tau}$, $\Phi(\bar{\theta})$, $\Psi(\bar{\tau}_l)$, $Z_э(\bar{\tau})$, $Z_с(\bar{\tau})$, $Z_в(\bar{\tau})$.

Найти: $\bar{\theta}_0 = \arg \min_{\{\bar{\theta}\}} \Phi(\bar{\theta})$, далее найти: $\bar{\tau}_0 = \arg \min_{\{\bar{\tau}_l\} \in \bar{\theta}_0} \Psi(\bar{\tau}_l)$.

Первый этап: найти оптимальную популяцию решений по $\Phi(\bar{\theta})$:

$$\bar{\theta}_0 = \arg \min_{\{\bar{\theta}\}} \Phi(\bar{\theta}).$$

Второй этап: найти оптимальный набор решений по $\bar{\tau}$:

$$\bar{\tau}_0 = \arg \min_{\{\bar{\tau}_l\} \in \bar{\theta}_0} \Psi(\bar{\tau}_l).$$

Множеством решений данной задачи является оптимальная, т.е. эффективная с точки зрения эксплуатации, совокупность наборов времен замен (ремонтов) элементов СТС.

Ограничением при решении задачи оптимизации будет требование на совокупность интервалов, заключающееся в том, что эти интервалы могут быть уменьшены до ближайшего интервала, но они не могут быть увеличены, так как в этом случае не будет обеспечена надежность СТС. Уменьшение до

ближайшего интервала обеспечивает сокращение количества выходов на объект, так как несколько элементов СТС заменяются или ремонтируются одновременно.

Критерий оптимальности решения задачи выражен целевой функцией или функцией приспособленности, значения которой используют для сравнения решений. В нашем случае целевая функция – это сумма стоимостей и затрат в процессе эксплуатации СТС из (2.1). Эти затраты зависят от совокупности интервалов замен (ремонтов) элементов, рассчитанных по изложенным ранее методам. Для оценки популяции решений используется средняя функция приспособленности популяции.

В рассматриваемой задаче оптимальным решением будет оптимальный набор времен замен (ремонтов) элементов \bar{t}_0 для всей СТС в целом, который доставляет минимум целевой функции и удовлетворяет заданному ограничению.

Для построения оптимального набора времен замен (ремонтов) элементов для всей СТС, т.е. оптимальной схемы ее эксплуатации, предлагаются следующие методы.

1. Для достижения экономического эффекта можно использовать синхронизацию. Данный метод применяется, когда оптимизация, с точки зрения затрат на эксплуатацию всей СТС в целом, может быть произведена за счет синхронизации замен (ремонтов) его элементов без их сдвигов. При этом интервалы, кратные друг другу, синхронизируются. В результате ремонт каждого элемента, исчерпавшего свой ресурс, будет происходить одновременно с ремонтом элемента, имеющего самый маленький ресурс. Таким образом, уменьшается количество замен (ремонтов) элементов для всей СТС в целом и, следовательно, уменьшаются затраты на ее эксплуатацию. Это происходит в результате того, что выезд специалистов на объект, транспортные затраты, применение специальной техники, приостановка использования СТС по назначению и другие факторы, связанные с заменой или ремонтом, влекут за собой большие материальные издержки.

При этом обеспечивается заданный уровень надежности, так как оптимальные интервалы замены (ремонта) для каждого элемента рассчитаны с учетом заданного уровня надежности.

2. С целью достижения более высокого уровня экономической эффективности по сравнению с синхронизацией можно использовать адаптированный генетический алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект, в котором сочетаются преимущества, детерминированного и стохастического подходов к оптимизации. СТС необходимо эксплуатировать по принципу: «максимум надежности при минимуме затрат на эксплуатацию», который означает минимизацию затрат при обеспечении заданного уровня надежности.

В силу своей специфики адаптированный генетический алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект хорошо подходит для решения нашей задачи, т.е. достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию СТС при условии обеспечения заданного уровня надежности. Основным способом достижения экономического эффекта, так же, как и при применении метода синхронизации, будет уменьшение количества выездов специалистов на объект.

Времена замен (ремонтов) элементов могут быть в небольших пределах изменены в сторону уменьшения в соответствии с ограничением данной задачи на совокупность оптимальных интервалов, и тем самым обеспечивается безопасность эксплуатации СТС. Эти сдвиги должны быть достаточно малыми, чтобы затраты на эксплуатацию не были слишком большими. Данные сдвиги времен замен (ремонтов) элементов позволяют уменьшить затраты на эксплуатацию всей СТС, т.е. оптимизация каждого отдельного элемента частично приносится в жертву ради оптимизации всей системы в целом.

3.3 Краткий обзор и анализ генетических алгоритмов

Генетический алгоритм работает следующим образом.

1. Генерируется начальная популяция решений, например, следующими способами:

1.1. производится инициализация, т. е. формирование начальной популяции, которое заключается в случайном выборе заданного количества членов популяции, представляемых последовательностями фиксированной длины [1];

1.2. начальная популяция генерируется случайным образом с использованием полного дерева с ограниченной максимальной глубиной [2];

1.3. начальная популяция формируется на основании детерминированного алгоритма.

В генетическом алгоритме для решения задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию СТС для формирования начальной популяции применяется детерминированный алгоритм.

2. Популяция оценивается с помощью специальной функции приспособленности, которая является целевой функцией оптимизации.

Функция приспособленности - специальная функция, служащая для оценки популяции по заданному критерию. Оценивание приспособленности всей популяции состоит в расчете функции приспособленности для каждого члена этой популяции. Чем больше значение этой функции, тем выше «качество» члена популяции.

Вид функции приспособленности зависит от характера решаемой задачи. Предполагается, что функция приспособленности всегда принимает неотрицательные значения, возможно, с заданной точностью и, кроме того, что для решения оптимизационной задачи требуется максимизировать функцию. Если исходная функция приспособленности не удовлетворяет этим условиям, то выполняется соответствующее преобразование (например, задачу минимизации функции можно легко свести к задаче максимизации) [1].

В генетическом алгоритме для решения задачи достижения оптимального уровня эксплуатационных затрат на СТС функция приспособленности используется при оценивании популяции.

3. Выполняется селекция (отбор) с помощью генетических операторов, в качестве которых используются, например, следующие.

3.1. Метод «рулетки» или отбор пропорциональной пригодности, описанный в [1, 3], получил название по аналогии с азартной игрой. Каждому члену популяции может быть сопоставлен сектор колеса рулетки, величина которого устанавливается пропорционально значению функции приспособленности данного члена популяции, поэтому чем больше значение функции приспособленности, тем больше сектор на колесе рулетки. Все колесо рулетки соответствует сумме значений функции приспособленности всех членов рассматриваемой популяции. Вероятность селекции каждого члена популяции или коэффициент участия данного члена популяции при выборе родителей вычисляется как отношение функции приспособленности этого члена популяции к сумме значений функции приспособленности всех членов рассматриваемой популяции, выраженное в процентах.

Селекция членов популяции может быть представлена как результат поворота колеса рулетки, поскольку «выигравший» (т. е. выбранный) член популяции относится к выпавшему сектору колеса. Очевидно, что чем больше сектор, тем больше вероятность «победы» соответствующего члена популяции. Поэтому вероятность выбора данного члена популяции оказывается пропорциональной значению его функции приспособленности. Если всю окружность колеса рулетки представить в виде цифрового промежутка $[0, 100]$, то выбор члена популяции можно отождествить с выбором числа из интервала $[a, b]$, где a и b обозначают соответственно начало и окончание фрагмента окружности, соответствующего этому сектору колеса; очевидно, что $0 \leq a < b \leq 100$. В этом случае выбор с помощью колеса рулетки сводится к выбору числа из интервала $[0, 100]$, которое соответствует конкретной точке на окружности колеса. В результате процесса селекции

создается родительская популяция, также называемая родительским пулом (mating pool) с численностью N , равной численности текущей популяции.

3.2. «Турнирный отбор» (tournament selection), описанный в [2, 3], при котором в популяции, содержащей N членов, выбирается случайным образом t членов. Лучший из них, т. е. имеющий большее значение функции приспособленности, записывается в промежуточный массив. Это операция повторяется N раз. Члены популяции из промежуточного массива затем используются для скрещивания (также случайным образом). Количество случайно выбираемых членов популяции t часто равно двум. В этом случае говорят о двоичном (парном) турнире, а t называют численностью турнира.

3.3. Панмиксия представляет собой свободное скрещивание членов популяции в пределах популяции или какой-либо группы внутри популяции [3]. О панмиксии можно говорить лишь тогда, когда каждый член популяции имеет равновероятные возможности скрещивания с любым другим членом популяции.

3.4. Инбридингом называется метод, когда первый родитель выбирается случайным образом, а второй родитель – член популяции, ближайший к первому [3, 4]. Под ближайшим членом популяции понимается наиболее близкий член в смысле минимального расстояния Хэмминга (в случае, если члены популяции представлены бинарными последовательностями фиксированной длины) или наиболее близкий член в смысле евклидова расстояния между двумя вещественными векторами (в случае, если члены популяции представлены вещественными числами). Так инбридинг можно охарактеризовать свойством концентрации поиска в локальных узлах, что фактически приводит к разбиению популяции на отдельные локальные группы вокруг подозрительных на экстремум мест.

3.5. Аутбридинг использует понятие схожести членов популяции [3]. В этом методе родители, выбираемые для образования потомков, формируются из максимально далеких членов популяции. Расстояния вычисляются теми же способами, что и в инбридинге. Но, в отличие от инбридинга, аутбридинг по-

другому влияет на поведение генетического алгоритма, т. е. направлен на противодействие сходимости алгоритма к уже найденным решениям, заставляя алгоритм просматривать новые неисследованные области.

3.6. Отбор усечением не имеет аналогов в естественной эволюции и обычно применяется для больших популяций, где число членов популяции $N > 100$ [3]. В этом методе используется параметр – порог отсечения T , также определяемый как интенсивность отбора, показывающий долю, т. е. часть популяции, которая отбирается в качестве родителей. Обычно эта доля составляет от 10 до 50%. При помощи этого метода сначала отбираемые члены популяции упорядочиваются согласно значениям их целевой функции. Затем в качестве родителей выбираются только лучшие члены популяции с учетом порога отсечения. Далее, с равной вероятностью, среди этих отобранных членов популяции случайным образом выбирают пары, которые производят потомков.

3.7. Элитарный отбор представляет собой метод, при котором в новое поколение включается заданное количество лучших членов популяции предыдущего поколения [3]. Все члены популяции оцениваются, и в новую популяцию отбирается заданное количество (например, 10%) самых лучших членов популяции, которые называются «элитными». Остальные члены популяции (например, 90%), не вошедшие в элиту, становятся родителями и порождают потомков. Таким образом создается комбинированная популяция, которая включает в себя как «элитных» членов популяции, так и потомков других членов популяции. Применение стратегии элитарности оказывается весьма полезным для эффективности генетического алгоритма, так как не допускает потерю лучших решений. Например, если не использовать элитарный отбор, то возможно возникновение следующей ситуации. Популяция находится в области локального минимума, а мутация вывела один из членов популяции в область глобального минимума, но этот член популяции, находящийся в области глобального минимума, с большей вероятностью будет потерян, так как будет скрещиваться с членами

популяции, находящимися в области локального минимума. Если же используется стратегия элитарности, то полученный самый лучший член популяции будет оставаться в популяции до тех пор, пока он не будет вытеснен еще более лучшими членами популяции из элитарного набора.

3.8. Отбор вытеснением представляет собой метод, когда в данном отборе выбор членов популяции в новую популяцию зависит как от величины ее функции приспособленности, так и от того, есть ли уже в сформированной популяции член популяции с аналогичным набором участков [3]. При проведении отбора из всех членов популяции родителей с одинаковой приспособленностью предпочтение сначала отдается членам популяции с разными наборами участков. Таким образом в популяции постоянно поддерживается разнообразие. Отбор вытеснением формирует новую популяцию скорее из удаленных членов популяции, вместо членов популяции, группирующихся около текущего найденного решения. Данный метод наиболее пригоден для многоэкстремальных задач, при этом помимо определения глобальных экстремумов появляется возможность выделить и те локальные экстремумы, значения которых близки к глобальным.

Проанализируем рассмотренные методы селекции с точки зрения того, насколько они подходят к задаче достижения оптимального уровня эксплуатационных затрат на СТС.

При панмиксии каждый член популяции имеет равные возможности стать родителем. Данный метод не подходит, так как он не позволяет сделать так, что родителями должны стать лучшие члены популяции.

При инбридинге первый родитель выбирается случайным образом, а вторым родителем является член популяции ближайший к первому. Таким образом количественная оценка членов популяции с помощью функции приспособленности не производится. Данный метод не подходит, так как один из родителей выбирается случайным образом.

При аутбридинге используется понятие схожести членов популяции. В этом методе родители, выбираемые для образования потомков, формируются

из максимально далеких членов популяции. Следовательно, формируются максимально отличающиеся от родителей новые члены популяции. При этом с точки зрения функции приспособленности эти члены не будут являться лучшими в качестве родителей.

При турнирном отборе анализируются не все члены популяции, а случайно выбранные группы. В этом случае не каждый член популяции оценивается вероятностью селекции члена популяции.

Таким образом предпочтение отдается методу «рулетки», в котором каждый член популяции оценивается вероятностью селекции члена популяции.

Для выполнения операции селекции в рассматриваемой задаче достижения оптимального уровня эксплуатационных затрат на СТС разработан собственный гибридный метод селекции или метод «выборной рулетки», включающий помимо метода рулетки, элитарный отбор и отбор усечением, которые его дополняют.

Сначала все члены популяции оцениваются с помощью функции приспособленности.

Далее применяется метод элитарного отбора и в новую популяцию отбирается заданное количество (например, 10%) самых лучших членов популяции, которые называются «элитными».

Затем используется метод отбора усечением. Из данного метода используется параметр – порог отсечения T , также определяемый как интенсивность отбора, показывающий долю, т. е. часть популяции, которая отбирается в качестве родителей. В данном случае порог отсечения T принимается равным 90%, следовательно, 10% членов популяции с наихудшими значениями функции приспособленности отбрасываются.

После этого к оставшимся после элитарного отбора и отбора усечением 80% членов популяции применяется метод рулетки.

Для каждого члена популяции рассчитывается вероятность селекции члена популяции, обозначаемого $p(ch_i)$, где ch_i – i -й член популяции, для $i =$

$\overline{1, N}$ (где N – (численность популяции), которой соответствует параметр $\vartheta(ch_i)$, выраженный в процентах, согласно формуле:

$$\vartheta(ch_i) = p(ch_i)100\%, \quad (3.1)$$

где

$$p(ch_i) = \frac{F(ch_i)}{\sum_{i=1}^N F(ch_i)}, \quad (3.2)$$

причем $p(ch_i)$ – вероятность селекции члена популяции ch_i , $F(ch_i)$ – значение функции приспособленности члена популяции ch_i .

В итоге 10% членов популяции отобрано с помощью элитарного отбора, еще 10% убраны из родителей с помощью порога отсечения. Таким образом родителями становятся 80% членов популяции, каждый из которых будет родителем с определенной вероятностью селекции члена популяции $p(ch_i)$, а 10% элитарных членов просто переносятся в следующую популяцию. Из тех членов популяции, которые стали родителями случайным образом, выбираются пары для создания потомков.

4. Выполняется оператор кроссинговера (скрещивания), который из каждой пары родителей, выбранных в результате селекции, создает потомка, например, следующими способами:

4.1. Классический кроссинговер (classic crossover) или однотоочный кроссинговер (Single point crossover), описанный в [1, 3], действует следующим образом. На первом этапе для каждой пары родителей определяется точка скрещивания, которая представляет собой случайное число в диапазоне от 2 до $L-1$, где L – это количество участков, из которых состоит каждый из родителей. На втором этапе формируется потомок, у

которого участки от 1 до l_k берутся от первого родителя, а участки от $l_k + 1$ до L – от второго родителя:

Родители Потомки

$$x_1 x_2 x_3 \dots x_{n-1} x_n \dots x_m \rightarrow x_1 x_2 x_3 \dots x_{n-1} y_n \dots y_m, \quad (3.3)$$

$$y_1 y_2 y_3 \dots y_{n-1} y_n \dots y_m \rightarrow y_1 y_2 y_3 \dots y_{n-1} x_n \dots x_m. \quad (3.4)$$

4.2. Двухточечный кроссинговер, описанный в [3], действует следующим образом. На первом этапе для каждой пары родителей определяется две точки скрещивания, которые представляют собой случайные числа k_1, k_2 в диапазоне от 1 до $L-1$, где L – количество участков, из которых состоит каждый из родителей. На втором этапе возможны два варианта. Если вторая точка скрещивания больше первой точки, то формируется потомок, у которого участки с номерами от 1 до k_1 берутся от первого родителя, далее участки от $k_1 + 1$ до k_2 – от второго родителя, затем участки от $k_2 + 1$ до L – опять от первого родителя. Если вторая точка скрещивания меньше первой точки, то формируется потомок, у которого участки от 1 до k_1 берутся от второго родителя, далее участки от $k_1 + 1$ до k_2 – от первого родителя, затем участки от $k_2 + 1$ до L – от второго родителя.

4.3. Многоточечный кроссинговер (Multi-point crossover), описанный в [3], представляет собой метод, при котором выбирается m точек скрещивания $k_i \in \overline{1, L-1}, i \in \overline{1, m}$, где L – это количество участков, из которых состоит каждый из родителей. Точки скрещивания выбираются случайно без повторений и сортируются в порядке возрастания. Эти m точек разбивают каждого из родителей на $m+1$ групп участков. При многоточечном кроссинговере происходит последовательный выбор групп участков родителей с чередованием, например, группы участков с нечетными номерами групп берутся от одного родителя, а группы участков с четными номерами групп – от другого родителя. Из этих групп участков, выбранных таким образом, формируется первый потомок. В случае, если чередование групп

участков берется в противоположном порядке, то формируется второй потомок.

Продemonстрируем применение многоточечного кроссинговера на примере двух родителей, состоящих из 11 участков ($L=11$):

$$\text{родитель 1: } 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0, \quad (3.5)$$

$$\text{родитель 2: } 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1. \quad (3.6)$$

Выберем три точки скрещивания ($m=3$):

$$2, 6, 10. \quad (3.7)$$

Создадим потомков:

$$\text{потомок 1: } 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1, \quad (3.8)$$

$$\text{потомок 2: } 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1. \quad (3.9)$$

Метод многоточечного кроссинговера применяется для скрещивания родителей с наименьшими значениями функции приспособленности.

4.4. Триадный кроссинговер (Triadic crossover), описанный в [3], представляет собой метод, в котором после выбора пары родителей из остальных членов популяции случайным образом выбирается такой, который в дальнейшем используется в качестве маски. Далее определенная часть участков маски, например 10 %, меняется. Затем участки первого родителя сравниваются с участками маски: если участки одинаковы, то они передаются первому потомку, в противном случае на соответствующие позиции участков потомка переходят участки второго родителя. Второй потомок отличается от первого тем, что на тех позициях, где у первого потомка стоят участки первого родителя, у второго потомка стоят участки второго родителя и наоборот.

4.5. Перетасовочный кроссинговер представляет собой метод, в котором члены популяции, отобранные в качестве родителей, случайным образом

обмениваются участками [3]. Затем выбирают точку для скрещивания и формируют потомков с помощью одноточечного кроссинговера. Таким образом, на каждой итерации перетасовочного кроссинговера создаются не только новые потомки, но и модифицируются родители, так как старые родители удаляются. Это позволяет сократить число операций по сравнению с одноточечным кроссинговером [3].

4.6. Кроссинговер с уменьшением замены действует таким образом, что для создания потомков выбираются только отличающиеся участки родителей [3]. Это осуществляется за счет ограничения на выбор точек скрещивания, которые должны появляться только там, где участки родителей различаются.

4.7. Кроссинговер на древовидных структурах действует следующим образом [2]. Члены популяции представляются в древообразной форме. Применяется три разновидности оператора кроссинговер на древовидных структурах:

- узловой оператор кроссинговера;
- кроссинговер поддеревьев;
- смешанный кроссинговер.

4.7.1. В узловом операторе кроссинговера выбираются два родителя и по одному узлу в каждом из них. Узлы в деревьях могут быть разного типа.

Поэтому сначала проверяется, что выбранные узлы у родителей – взаимозаменяемы. Если узлы не являются взаимозаменяемыми, то у одного из родителей выбирается другой узел, так чтобы он был взаимозаменяем. Далее производится обмен узлов. Поддеревья узлов остаются на месте.

4.7.2. В кроссинговере поддеревьев родители обмениваются не узлами, а определяемыми ими поддеревьями.

После выбора родителей и узлов в них проверяется, что выбранные узлы взаимозаменяемы, т.е. принадлежат одному типу. Иначе, как и в предыдущем случае, в одном из деревьев выбирается другой узел с последующей проверкой взаимозаменяемости.

Затем производится обмен поддеревьев, которые определены этими узлами.

Далее вычисляется размер (сложность потомка) для ожидаемых потомков. При этом под размером поддерева понимается либо его высота, либо число его вершин. Если ожидаемый размер не соответствует заданному порогу, то этот обмен не происходит и выбираются другие поддеревья для обмена.

Кроссинговер поддеревьев является основным оператором кроссинговера на древовидных структурах.

4.7.3. При смешанном операторе кроссинговера для одних узлов выполняется узловой оператор кроссинговера, а для других - кроссинговер поддеревьев.

Для выполнения операции кроссинговера в рассматриваемой задаче достижения оптимального уровня эксплуатационных затрат на СТС разработан собственный гибридный метод, включающий помимо метода одноточечного кроссинговера и метод кроссинговера с уменьшением замены. Сначала применяется метод кроссинговера с уменьшением замены, т.е. для создания потомка выбираются только отличающиеся участки родителей. Это осуществляется за счет ограничения на выбор точек скрещивания, которые должны появляться только там, где участки родителей различаются. Таким образом, для каждой пары родителей определяется точка скрещивания, которая представляет собой случайное число из выбранных предполагаемых точек скрещивания в диапазоне от 2 до $L-1$, где L – количество предполагаемых точек скрещивания, из которых состоит каждый из родителей.

Кроссинговер формирует новых членов популяции на основе двух имеющихся родителей, комбинируя их части. Поэтому число различных новых членов популяции, которые могут быть получены кроссинговером при использовании одной и той же пары родителей, ограничено. Соответственно пространство, которое генетический алгоритм может покрыть, используя

лишь кроссинговер, жестко зависит от разнообразия участков популяции. Чем разнообразнее участки родителей, тем больше пространство покрытия. При обнаружении локального экстремума функции приспособленности соответствующий ему член популяции будет стремиться занять лидирующую позицию в популяции при выборе родителей и алгоритм может сойтись к локальному экстремуму. Поэтому в генетическом алгоритме важную роль играют мутации. Существуют несколько способов мутации членов популяции.

5. Выполняется оператор мутации (mutation), который изменяет участки членов популяции. Это делается следующими способами:

5.1 Оператор мутации с вероятностью, напоминающий рассмотренный в [1, 3], можно более полно описать так. Для каждого члена популяции который будет подвержен мутации, выполняются следующие действия. Для каждого i -го участка члена популяции, вычисляется случайное число p_{mi} , расположенное на отрезке $[0; 1]$, которое интерпретируется как вероятность мутации этого участка p_i . Далее каждое такое число сравнивается с заранее заданным пороговым значением p_0 , близким к единице, т.е. проверяется условие

$$p_{mi} \geq p_0, i = \overline{1, N}, \quad (3.10)$$

где N – количество участков члена популяции.

Если это условие выполнено, то значение i -го участка члена популяции меняется с 0 на 1 или с 1 на 0 соответственно. Например, если в члене популяции [100110101010] мутации подвергается участок на позиции семь, то его значение, равное 1, изменится на 0, что приводит к образованию члена популяции [100110001010].

За счет выбора порогового значения p_0 можно варьировать степень мутации члена популяции. Чем ближе пороговое значение к 1, тем вероятность того, что произойдет мутация хотя бы в одном участке этого члена популяции, будет меньше. В качестве порогового значения можно выбрать

$$p_0 = 1 - \frac{1}{N}. \quad (3.11)$$

Вместо выбора порогового значения p_0 можно задавать детерминированно или случайно количество членов популяции, которые будут подвергнуты мутации. Например, можно задать, что мутации будет подвержен только один участок члена популяции с наибольшей вероятностью p_{mi} или заданное количество участков члена популяции с наибольшими вероятностями p_{mi} . Количество участков члена популяции, которые будут подвергнуты мутации, также можно выбирать случайно.

Так же, как и кроссинговер, мутации могут проводиться не только по одной случайной точке. Можно выбирать для изменения несколько точек в члене популяции, причем их число также может быть случайным. Используют и мутации с изменением сразу некоторой группы подряд идущих точек.

Вероятность мутации p_m , как правило $p_m \ll 1$, может являться или фиксированным случайным числом на отрезке $[0, 1]$, или функцией от какой-либо характеристики решаемой задачи. Например, можно положить вероятность мутирования участков, обратно пропорциональную числу всех участков в члене популяции.

Оператор мутации с вероятностью может также применяться для членов популяции, участки которых заданы вещественными числами. При этом мутирующий участок заменяется на случайное вещественное число в заранее заданном диапазоне, который является одинаковым для всей популяции и соответствует рассматриваемой задаче.

5.2. Мутация с изменением количества участков члена популяции, описана в [1, 3]. Пусть член популяции t представлен следующей последовательностью участков: $t = t_1, \dots, t_N$, где N - количество участков члена популяции. Мутация случается одним из следующих способов.

5.2.1. В процессе мутации присоединяется случайный участок или набор случайных участков s длиной k из совокупности всевозможных значений

участков к концу последовательности, т. е. член популяции превращается в последовательность $t \rightarrow t_1, \dots, t_N, s$.

5.2.2. В процессе мутации происходит вставка случайного участка или набора случайных участков s длиной k из совокупности всевозможных значений участков в случайно выбранную позицию в последовательности, т. е. член популяции превращается в последовательность: $t \rightarrow t_1, \dots, t_{i-1}, s, t_i, \dots, t_N$.

5.2.3. В процессе мутации наблюдается удаление случайно выбранного участка или набора случайных участков s длиной k из последовательности, т. е. член популяции превращается в последовательность: $t \rightarrow t_1, \dots, t_i, t_{i+k+1}, \dots, t_N$.

5.2.4. В процессе мутации начинается обмен случайно выбранными участками или случайно выбранными наборами участков p и q длиной k и m соответственно в последовательности, т. е. член популяции превращается в

последовательность: $t_1, \dots, t_i, p, t_{i+k+1}, \dots, t_j, q, t_{j+m+1}, \dots, t_N \rightarrow$

$t_1, \dots, t_i, q, t_{i+k+1}, \dots, t_j, p, t_{j+m+1}, \dots, t_N$.

5.3. Оператор двоичной мутации, (Binary mutation), описанный в [3, 4], происходит следующим образом. Для членов популяции, представленных в виде двоичного кода, мутация заключается в случайной инверсии участка (0 заменяется на 1 или наоборот). Эффект мутации зависит от того в каком из этих представлений записан член популяции. Так в одних задачах при мутации наилучший эффект достигается в случае, когда члены популяции представлены в виде кода Грея, а в других – с помощью двоичного кода.

5.4. Оператор мутации, где главную роль играет процесс дубликации, т.е. удвоения протекает следующим образом [3]. В члене популяции случайным образом выбирается участок, который дублируется в этом члене популяции. Пусть член популяции t представлен последовательностью участков: $t = t_1, \dots, t_k, \dots, t_N$, где N - количество участков члена популяции.

Тогда при применении оператора дубликации к участку t_k мы получим следующий член популяции: $t = t_1, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots, t_N$.

В случае многократного дублирования определенного участка в члене популяции данный оператор получит название амплификация.

5.5. Мутация поддерева (subtree mutation) представляет метод генетического алгоритма, когда члены популяции описаны в древообразной форме [2, 4]. В таких случаях мутация поддерева происходит следующим образом. В дереве случайным образом выбирается точка мутации и корневое поддерево заменяется на случайно сгенерированное поддерево.

5.6. Точечная мутация, рассмотренная в [3], случается, если для каждого члена популяции определяется точка мутации, которая представляет собой случайное число в диапазоне от 1 до L . Здесь L – количество участков, из которых состоит каждый из членов популяции. В данной точке происходит случайная мутация участка члена популяции. Пусть член популяции t представлен следующей последовательностью участков: $t = t_1, \dots, t_k, \dots, t_N$, где N – количество участков члена популяции. Тогда при применении оператора точечной мутации к участку t_k , который заменяется на участок t_m , получим член популяции $t = t_1, \dots, t_m, \dots, t_N$.

Для выполнения операции мутации в приведенной задаче достижения оптимального уровня эксплуатационных затрат на СТС разработан собственный гибридный метод, включающий помимо метода точечной мутации метод мутации с вероятностью.

Оператор мутации с вероятностью, напоминающий рассмотренный в [1, 3], можно более полно описать следующим образом. Для каждого члена популяции, который будет подвержен мутации, выполняются следующие действия. Для каждого i -го участка члена популяции вычисляется случайное число, расположенное на отрезке $[0;1]$, которое интерпретируется как вероятность мутации этого участка p_i . Далее каждое p_{mi} сравнивается с заранее заданным пороговым значением p_0 , близким к единице, т.е. проверяется условие

$$p_{mi} \geq p_0, i = \overline{1, N}, \quad (3.12)$$

где N – количество участков члена популяции.

Затем из выбранных точек определяется точка мутации, которая представляет собой случайное число в диапазоне от 1 до L , где L – количество предполагаемых точек мутации. В данной точке происходит случайная мутация участка члена популяции.

В процессе поиска решения необходимо соблюдать баланс между «эксплуатацией» полученных на текущий момент лучших решений и расширением пространства поиска, чтобы избежать генетического вырождения.

При этом операторы селекции и кроссинговера делают поиск направленным, а оператор мутации обеспечивает широту поиска, т. е. расширение пространства поиска на всю популяцию (множество решений).

В отличие от других методов оптимизации генетический алгоритм оптимизирует различные области пространства решений одновременно и более приспособлен к нахождению новых областей с лучшими значениями целевой функции за счет объединения квазиоптимальных решений из разных популяций. Поэтому генетический алгоритм хорошо подходит для сокращения количества замен или ремонтов элементов СТС путем объединения оптимальных интервалов замен или ремонтов. Тем самым уменьшится количество выходов на объект эксплуатации и, следовательно, сократятся затраты на осуществление замен или ремонтов, а значит, повысится эффективность эксплуатации всей СТС в целом.

3.4 Решение задачи оптимизации замен (ремонтов) элементов

Покажем, как адаптированный генетический алгоритм позволяет сократить количество замен и ремонтов элементов СТС, т. е. минимизировать

затраты на ее эксплуатацию при условии обеспечения заданного уровня надежности. Для этого рассмотрим небольшой тестовый пример.

Для создания начальной популяции при применении адаптированный генетического алгоритма необходимо сформировать наборы начальных решений. В нашем примере начальная популяция будет состоять из пяти наборов таких решений.

Первым набором решений начальной популяции адаптированного генетического алгоритма будем считать начальный набор оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов, состоящий из 10 интервалов и полученный на основании расчетов с помощью метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами [72-75, 22] и рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов СТС [5, 11, 13].

Для построения следующих (в данном случае четырех) наборов решений начальной популяции необходимо выполнить процесс сдвига по времени интервалов замен (ремонтов) нескольких разнородных элементов. Сдвиг по времени интервалов необходимо провести таким образом, чтобы время замены данного элемента равнялось времени замены другого элемента с наименьшим интервалом или было кратно интервалу замены такого элемента. Для реализации таких сдвигов нужно осуществить процесс слияния. Под слиянием будем понимать выполнение одновременной замены (ремонта) двух и более элементов, при этом для одного элемента это будет оптимальное время, а для остальных – близкое к оптимальному.

Результат процедуры слияния для создания четырех дополнительных наборов решений из 10 оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов представлен в таблице 3.1. В первом столбце таблицы приведен начальный набор оптимальных интервалов, а в столбцах со второго по пятый – четыре набора оптимальных интервалов, созданные с помощью процедуры слияния.

Таким образом в пяти столбцах представлены пять наборов оптимальных интервалов, образующих начальную популяцию.

Таблица 3.1 – Результат процесса слияния для создания начальной популяции решений

Оптимальные интервалы	Оптимальные интервалы, слитые по два	Оптимальные интервалы, слитые по три	Оптимальные интервалы, слитые через один	Оптимальные интервалы, слитые через два
1	2	3	4	5
τ_1	τ_1, τ_2	τ_1, τ_2, τ_3	τ_1, τ_3	τ_1, τ_4
τ_2			τ_2, τ_4	τ_2, τ_5
τ_3	τ_3, τ_4			τ_3, τ_6
τ_4		τ_4, τ_5, τ_6		
τ_5	τ_5, τ_6		τ_5, τ_7	
τ_6			τ_6, τ_8	
τ_7	τ_7, τ_8	τ_7, τ_8, τ_9		τ_7, τ_{10}
τ_8				τ_8, τ_9
τ_9	τ_9, τ_{10}	τ_{10}	τ_9, τ_{10}	
τ_{10}				

Далее построенная популяция оценивается с использованием функции приспособленности. В данном случае функция приспособленности – это среднее значение суммы следующих затрат по всем пяти наборам:

- стоимость замен (ремонтов) элементов СТС;
- затраты на выезд специалистов для замен (ремонтов) элементов;
- стоимость времени работы элементов, которые были заменены раньше времени своей оптимальной замены.

Функция приспособленности является целевой функцией в данной задаче оптимизации, а оптимизация состоит в достижении наименьшего значения этой целевой функции.

Для всех наборов решений осуществляется операция селекции (отбора) с помощью гибридного метода или метода выборной рулетки, включающий помимо метода рулетки, элитарный отбор и отбор усечением.

Сначала все члены популяции оцениваются с помощью функции приспособленности.

Далее применяется метод элитарного отбора и в новую популяцию отбирается 10 % элитных членов популяции.

Затем используется метод отбора усечением, при котором порог отсекается T принимается равным 90%.

К оставшимся после элитарного отбора и отбора усечением 80% членов популяции применяется метод рулетки. С помощью полученного значения целевой функции можно построить следующую популяцию решений.

Для каждого решения, т.е. набора интервалов, определяется своя сумма затрат. Далее для каждого i -го набора вычисляется по формуле (3.13) коэффициент участия K_i , т.е. отношение обратной величины затрат этого набора к сумме обратных величин затрат по всем наборам:

$$K_i = \frac{\frac{1}{S_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}}, \quad (3.13)$$

где $\frac{1}{S_i}$ – обратная величина затрат этого набора,

$\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}$ – сумма обратных величин затрат по всем наборам,

n – количество всех наборов (в рассматриваемом примере $n = 5$).

Количество наилучших решений в качестве родителей для создания последующего набора решений задается таким образом: частота появления i -го набора решений в качестве родителя для создания дочерней популяции приблизительно равна коэффициенту участия K_i этого набора. Следовательно, наборы решений с большим коэффициентом участия K_i появляются в качестве родителей для создания дочерней популяции решений пропорционально большему числу раз, чем наборы с меньшим коэффициентом участия. Таким

образом, из пяти наборов решений родительской популяции образуется 10 наборов решений для создания дочерней популяции, где каждый набор решений родительской популяции встречается такое количество раз, которое соответствует его коэффициенту участия.

Для построения дочерней популяции используется кроссинговер, включающий помимо метода одноточечного кроссинговера и метод кроссинговера с уменьшением замены. В данной операции применяется гибридный метод кроссинговера. Сначала из 10 родительских наборов случайным образом выбирается пять пар. Затем каждая пара родителей случайным образом порождает набор из 10 интервалов, который является дочерним. Таким образом, образуется пять новых наборов интервалов.

Далее для полученной новой популяции рассчитывается функция приспособленности. Здесь возможны три варианта дальнейших действий.

Первый вариант: функция приспособленности дочерней популяции оказалась меньше, т.е. лучше, родительской. В этом случае продолжается поиск лучшего решения, т.е. повторяются операции «селекция» и «кроссинговер» и формируется новый дочерний набор.

Второй вариант: функция приспособленности дочерней популяции оказалась больше, т. е. хуже, родительской. Тогда применяется гибридный метод мутации, включающий помимо метода точечной мутации метод мутации с вероятностью, т. е. случайное изменение набора из 10 интервалов для того, чтобы заново начать поиск наилучшего решения.

Третий вариант: функция приспособленности дочерней популяции оказалась слишком близка к родительской. Возникает состояние схождения, т. е. такое состояние, когда функция приспособленности «замораживается» и перестает меняться. В такой ситуации кроссинговер практически никак не изменяет популяции, так как создаваемые при нем потомки представляют собой копии наборов из родительской популяции. В этом случае также происходит операция мутации, с помощью гибридного метода мутации, который включает помимо метода точечной мутации метод мутации с

вероятностью, и начинается новый поиск наилучшего решения, чтобы уйти от локального экстремума функции приспособленности и найти глобальный.

Поиск наилучшего решения прекращается, если заданное количество раз возникло состояние схождения с очень близкими значениями функции приспособленности и, в результате выполнения мутаций, происходит возврат в то же самое состояние. Это означает, что найдено минимальное значение функции приспособленности, т.е. наилучшее решение [25, 76].

4 АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС

На основе рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов СТС [11, 13], описанного в п. п. 2.3.4, 2.3.5 второй главы, в этой главе построен рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени, введенных в пункте 2.3.2 второй главы, представленный на рисунке 4.1.

Данный алгоритм состоит из последовательности следующих шагов.

Первый шаг.

Задаются следующие исходные данные: матрица, показывающая без каких конгломерирующих элементов система станет неработоспособной, которую назовем матрицей связности элементов системы; матрица коэффициентов критичности α и групповой конгломерации β ; параметры $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ закона распределения для каждого элемента, определяющие зависимость вероятности безотказной работы от прошедшей нагрузки.

Матрица связности и коэффициенты α и β однозначно определяют к какой группе относится данный элемент: критичным, критичным конгломерирующим, некритичным конгломерирующим, некритичным элементом. В матрице коэффициентов критичности α и групповой конгломерации β количество строк равно количеству элементов, количество столбцов равно 3.

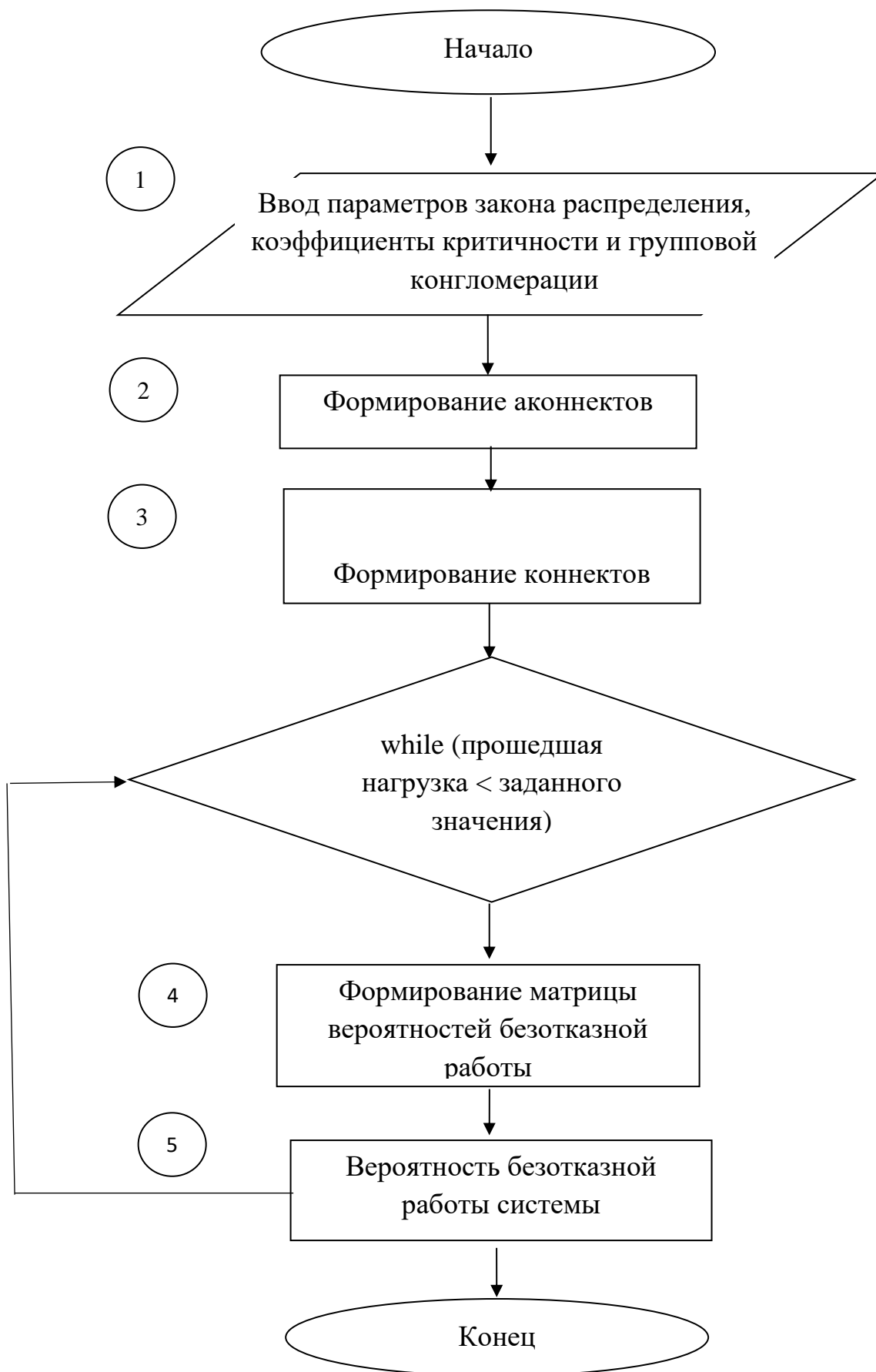


Рисунок 4.1 – Алгоритм рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов СТС

В каждой строке этой матрицы в первом столбце записан номер элемента, во втором коэффициент критичности α , в третьем коэффициент групповой конгломерации β . Вышеперечисленные данные помещаются в файлы с расширением .dat.

Далее считываются и обрабатываются данные из файлов, сформированных на первом шаге. Номера элементов определенной группы считываются из файла. В этом файле находятся номера элементов всех четырех групп.

Для того чтобы определить к какой группе относится элемент с определенным номером, необходимо проверить коэффициенты α и β , относящиеся к этому элементу. Если $\alpha=1$ и $\beta=0$, то элемент относится к группе критичных элементов; если $\alpha=1$ и $\beta=1$, то элемент относится к группе критичных конгломерирующих элементов. Если $\alpha=0$ и $\beta=1$, то элемент относится к группе некритичных конгломерирующих элементов; если $\alpha=0$ и $\beta=0$, то элемент относится к группе некритичных элементов.

Если в матрице связности на пересечении i -ой строки и j -ого столбца стоит 1, то в случае одновременного отказа i -ого и j -ого элементов откажет вся система. Такие элементы могут относиться к двум группам: критичных конгломерирующих и некритичных конгломерирующих. Если элемент относится к критичным конгломерирующим, то в файле `elementu_systemu.dat` ему соответствуют коэффициенты $\alpha=1$ и $\beta=0$. Если в файле `elementu_systemu.dat` этому элементу соответствуют другие коэффициенты, то данный элемент относится к некритичным конгломерирующим.

Далее на этом шаге формируется вектор под названием `group` вектор, в который записываются в порядке возрастания номера элементов следующих трех групп: некритичные, некритичные конгломерирующие, критичные конгломерирующие элементы.

Далее на этом шаге формируется вектор под названием `kritich_konglom` вектор, в который записываются в порядке возрастания номера критичных конгломерирующих элементов.

Второй шаг.

Перебираются возможные комбинации элементов, относящихся к трем группам: не критичные элементы, критичные конгломерирующие, не критичные конгломерирующие элементы, т.е. формируются аконнекты, определение которых, так же, как и определение коннектов, было сформулировано в п. 2.3.3 главы 2.

Число аконнектов можно определить с помощью бинома Ньютона:

$$(A + B)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k A^{n-k} B^k. \quad (4.1)$$

Если $A=1$, $B=1$, то количество всевозможных комбинаций 2^n . Поэтому количество всевозможных аконнектов будет 2^n-1 , так как бином включает комбинацию, которая является пустым множеством, а в число аконнектов такая комбинация не входит. Здесь n – количество элементов в системе.

Если элементы находятся в группах критичных конгломерирующих и не критичных конгломерирующих, то аконнект, в котором встречаются данные элементы исключается из рассмотрения, так как в порожденном им коннекте будут отсутствовать элементы, одновременное отсутствие которых приводит к отказу всей системы.

Третий шаг.

Составляются коннекты успешного функционирования из порядковых номеров элементов. Каждый аконнект порождает коннект и, кроме этого, существует коннект, который включает все элементы. Поэтому количество всевозможных коннектов на единицу больше, чем количество аконнектов, что составляет 2^n .

Из этих коннектов составляется матрица, каждая строка которой соответствует определенному коннекту, а в столбцах записаны номера элементов, принадлежащих этому коннекту.

Четвертый шаг.

На этом шаге задается прошедшая нагрузка, для которой необходимо спрогнозировать вероятность безотказной работы системы.

На основе матрицы коннектов создается новая матрица, которую назовем матрицей вероятностей безотказной работы.

У этой матрицы каждая строка, так же, как и в матрице коннектов, соответствует определенному элементу, а в столбцах помещаются соответствующие этим элементам вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказной работы вычисляется по заданному уровню прошедшей нагрузки с использованием коэффициентов $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$, заданных на первом шаге.

Вероятность безотказной работы элемента коннекта, который входит в группу критичных конгломерирующих элементов, умножается на коэффициент, учитывающий принадлежность к этой группе. Таким образом на данный коэффициент вероятность элементов умножится столько раз, сколько элементов в коннекте из группы критичных конгломерирующих. Коэффициент задается отдельно в виде константы.

Пятый шаг. С помощью рекуррентного алгоритма, описанного в п.п. 2.3.3, 2.3.4 второй главы, рассчитывается надежность сложной технической системы, такой как искусственное сооружение с использованием весовых коэффициентов для каждого элемента.

В конце пятого шага получается вероятность безотказной работы системы для заданного уровня прошедшей нагрузки.

Цикл.

Для всех задаваемых значений уровня прошедшей нагрузки повторяются шаги четыре и пять алгоритма.

Результатом работы алгоритма является вектор, в котором записаны вероятности безотказной работы системы для всех заданных значений прошедшей нагрузки.

Анализ разработанного рекуррентного алгоритма показывает, что с добавлением нового элемента вероятность безотказной работы сложной технической системы снижается, а с добавлением нового коннекта вероятность безотказной работы сложной технической системы

увеличивается. Результатом работы рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонт) элементов этой системы в предшествующие моменты времени является значение вероятности безотказной работы в заданный момент времени или, что тоже самое, при заданном значении прошедшей нагрузки. По этим значениям строится график вероятности безотказной работы всей сложной технической системы, такой как искусственное сооружение, в зависимости от времени или прошедшей нагрузки от начала эксплуатации сооружения на данном участке пути, что позволяет рассчитать срок эксплуатации СТС.

4.2 Алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы

В настоящей главе построен алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения [16, 64], описанной в параграфе 2.4 второй главы.

Алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения представлен в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 4.2.

Алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы состоит из последовательности следующих шагов.

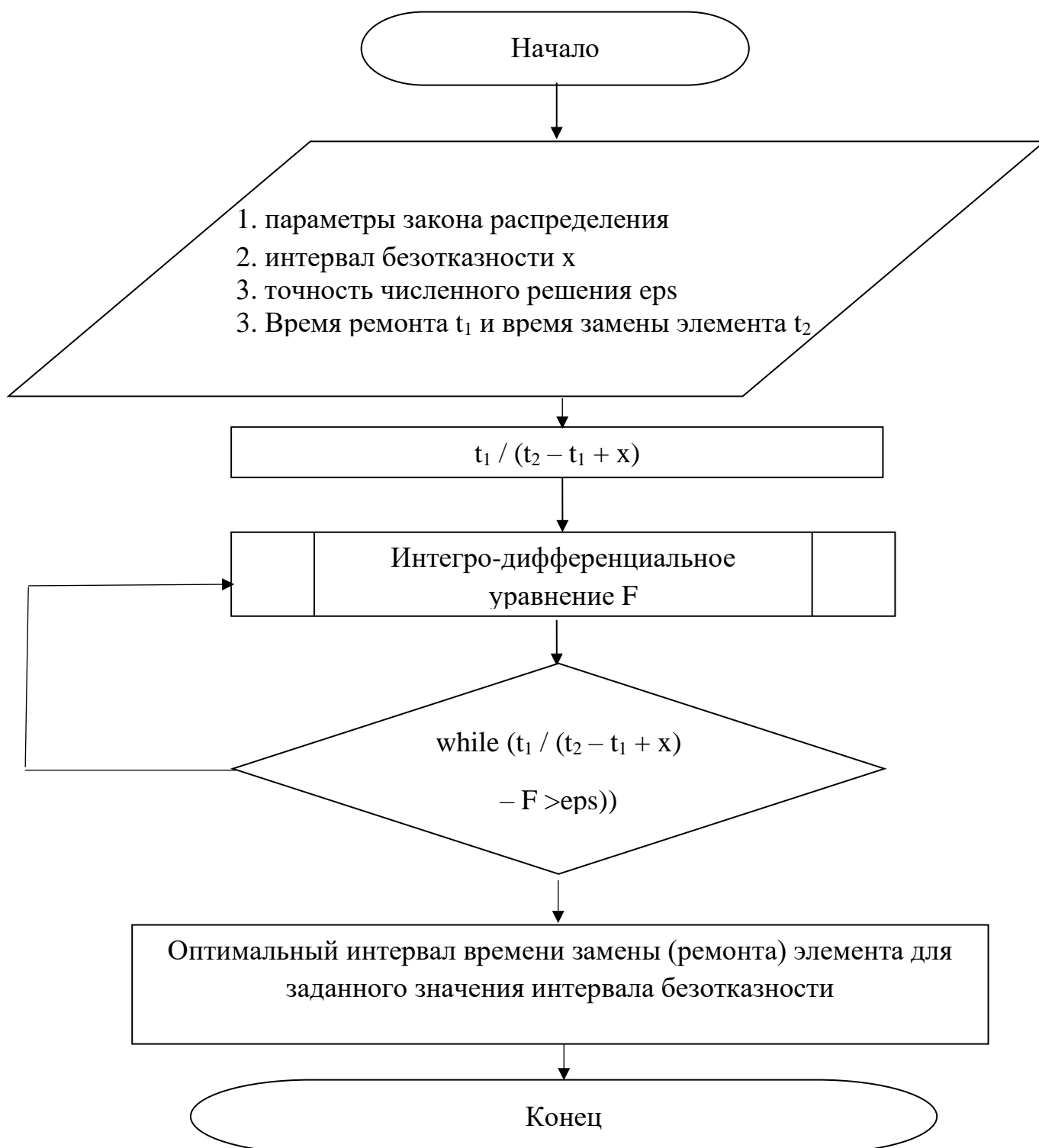


Рисунок 4.2 – Алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы в

Первый шаг.

Задаются следующие исходные данные:

- параметры $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ закона распределения для каждого элемента, определяющие зависимость вероятности безотказной работы от прошедшей нагрузки;
- прошедшая нагрузка за интервал безотказности, т. е. время, которое элемент должен проработать безотказно, в млн. т.;
- прошедшая нагрузка за время, необходимое на ремонт элементов системы, в млн. т.;
- прошедшая нагрузка за время, необходимое на замену элементов системы, в млн. т.;
- точность численного решения уравнения;

Второй шаг.

Считываются из файла все вышеперечисленные исходные данные.

Третий шаг.

Интегрально-дифференциальное уравнение решается численным методом. Для его решения необходимо вычислять значения функции Вейбулла. Для вычисления интеграла использован метод Симпсона.

Четвертый шаг.

Результатом решения интегрально-дифференциального уравнения является оптимальный интервал времени замены (ремонта) элемента для заданного значения интервала безотказности. Результаты решения уравнения для различных интервалов безотказности записываются в вектор.

Рассмотрим более подробно интегрально-дифференциальное уравнение, которое решается в алгоритме. Если функция отказа элемента сложной технической системы соответствует распределению Вейбулла, то алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы строится на основе функции распределения Вейбулла. В этом случае функция распределения $F(t)$ записывается следующим образом:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}. \quad (4.2)$$

Уравнение для поиска оптимального интервала в соответствии с уравнением (2.49) главы 2 выглядит следующим образом:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau) \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt - F(\tau). \quad (4.3)$$

В (4.3) $\lambda(\tau)$, которая называется опасностью отказа, записывается следующим образом:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (4.4)$$

Подставив (4.2) в (4.4) получаем:

$$\lambda(\tau) = \frac{\left(1 - e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}\right)'}{e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}} = -\frac{-\tilde{\alpha} \frac{1}{\beta^{\tilde{\alpha}}} \tau^{\tilde{\alpha}-1} \left(e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}\right)}{e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}} = \tilde{\alpha} \frac{1}{\beta^{\tilde{\alpha}}} \tau^{\tilde{\alpha}-1}. \quad (4.5)$$

Подставив (4.3) и (4.5) в (4.4), получаем:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \tilde{\alpha} \frac{1}{\beta^{\tilde{\alpha}}} \tau^{\tilde{\alpha}-1} \int_0^{\tau} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}\right) dt - 1 + e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\tilde{\alpha}}}. \quad (4.6)$$

Описанный выше алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения предназначен для решения уравнения (4.6).

4.3 Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием модифицированного генетического алгоритма

Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием

модифицированного генетического алгоритма [15, 23, 25], включающего в себя гибридные операторы кроссинговера, селекции и мутации представлен на рисунке 4.3.

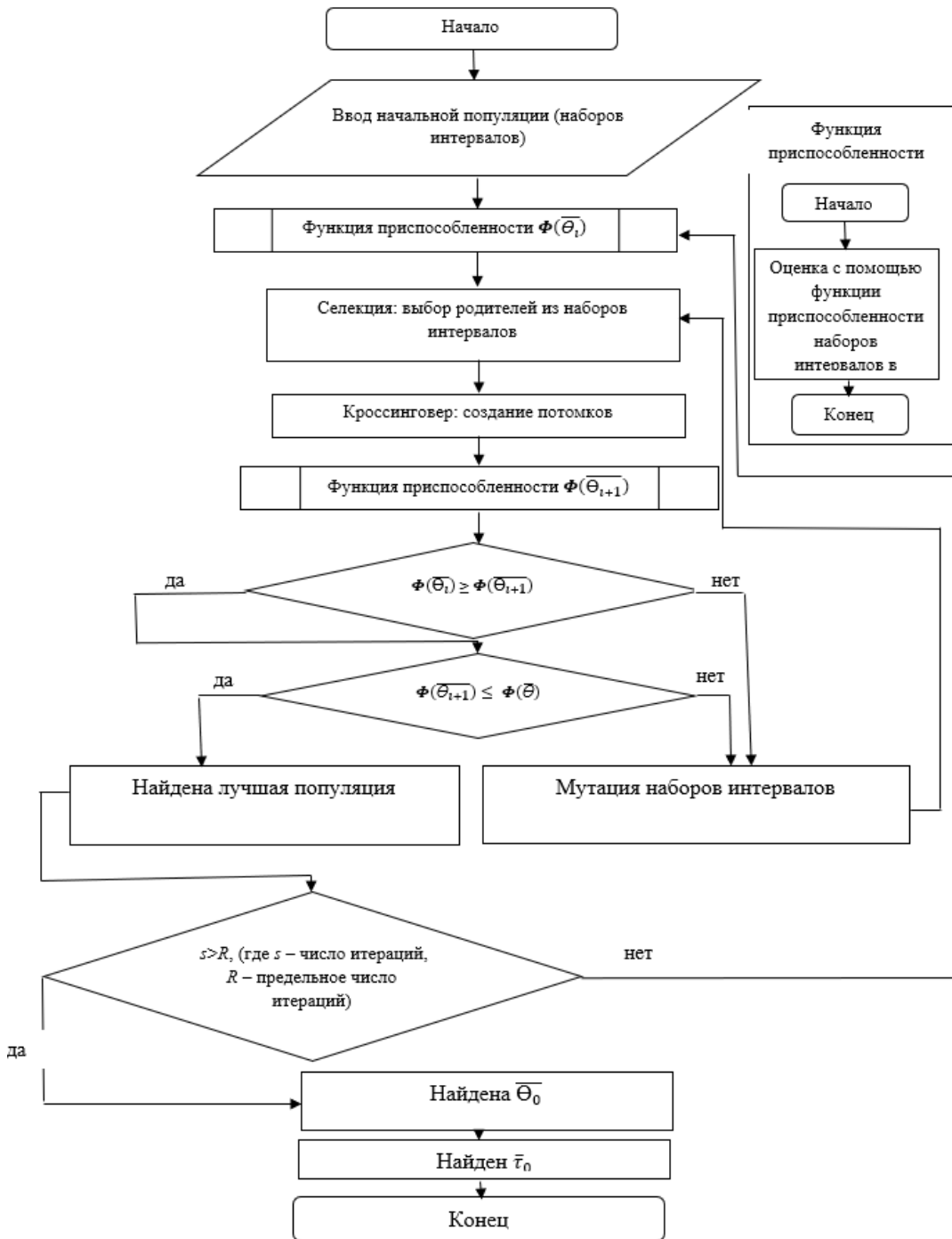


Рисунок 4.3 – Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС

На основе этой блок-схемы разработано программное обеспечение для решения практических задач оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием

модифицированного генетического алгоритма, включающего в себя гибридные операторы кроссинговера, селекции и мутации.

4.4 Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации

Алгоритм синхронизации является альтернативным методом для адаптированного генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. На основании алгоритма, изложенного в пункте 4.2, можно вычислить оптимальные интервалы замен (ремонтов) для всех элементов сложной технической системы, такой как искусственное сооружение. Таким образом мы получаем некоторое множество интервалов. Поместив эти интервалы на числовую ось, мы получим времена, в которые нужно выходить на замены или ремонты. Однако, слишком частые выходы могут оказаться неэффективными, так как каждый выход связан с большими материальными затратами. Поэтому последовательность времен выходов можно оптимизировать по критерию минимизации количества выходов.

Оптимизацию по критерию минимизации количества выходов можно осуществить следующим образом.

Сначала с помощью алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения производится расчет оптимальных интервалов времени замен (ремонтов) элементов СТС: $\{\tau_{0i}\}$, где $i = \overline{1, n}$, n – число элементов системы. Далее из этой совокупности оптимальных интервалов выбирается наименьший τ_{0min} . Другие оптимальные интервалы округляются до ближайшего целого с недостатком, кратного наименьшему оптимальному интервалу. В результате получается новый набор оптимальных интервалов, кратных наименьшему, и ремонт каждого элемента будет осуществляться

вместе с ремонтом элемента, оптимальный интервал которого является наименьшим.

Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации представлен следующей блок-схемой на рисунке 4.4.

Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации состоит из последовательности следующих шагов.

Первый шаг.

Задаются следующие исходные данные: оптимальные интервалы, рассчитанные с помощью алгоритма расчета времени оптимальных интервалов замен или ремонтов элементов.

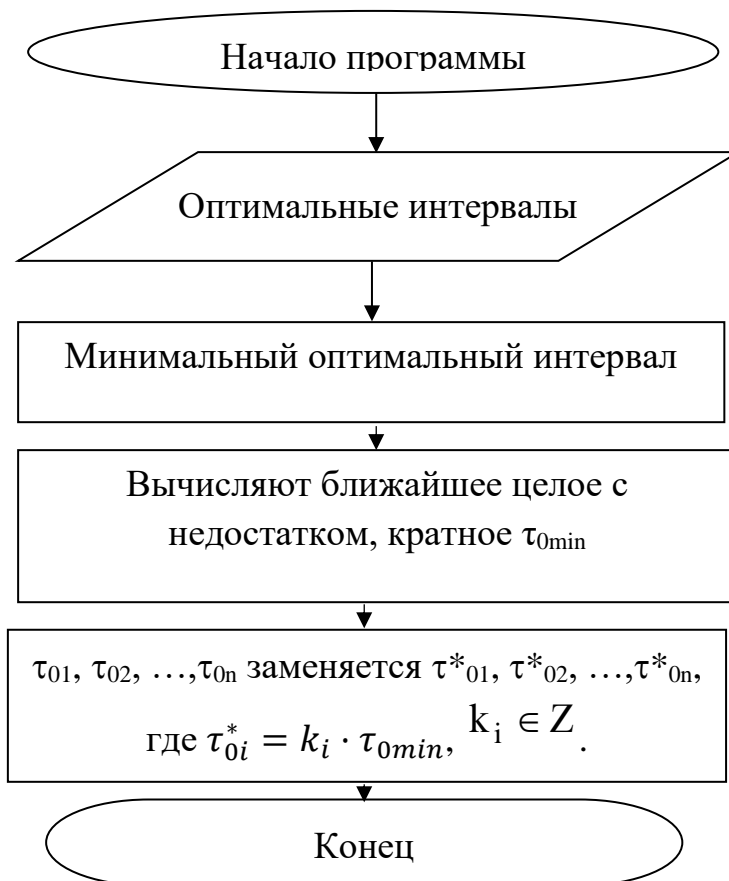


Рисунок 4.4 – Алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации

Второй шаг.

Выбирается самый маленький оптимальный интервал времени замены или ремонта элемента. Остальные интервалы времени пересчитываются таким образом, чтобы они стали кратными самому маленькому интервалу.

Третий шаг.

Определяются номера элементов, которые будут заменяться одновременно в интервалы времени, кратные минимальному оптимальному интервалу.

Изложенный подход позволит уменьшить количество выходов на объект и, тем самым, сэкономить средства, расходуемые на эксплуатацию сложных технических систем. Это позволит увеличить эффективность эксплуатации при обеспечении заданного уровня надежности.

В данной главе описаны следующие алгоритмы: рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени, алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения, алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием модифицированного генетического алгоритма, включающего в себя гибридные операторы кроссинговера, селекции и мутации, алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию сложной технической системы с использованием синхронизации.

5 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В этой главе описан созданный программный комплекс «Надежность СТС», а также построена схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации и изложены ее этапы. В программном комплексе «Надежность СТС» реализованы все алгоритмы управления техническим состоянием СТС, описанные в статьях [10, 13, 15, 16, 17, 23], и предыдущих главах диссертационной работы. Программный комплекс написан на языке C++. Интерфейс программного комплекса написан с помощью Win API, то есть с использованием целого набора базовых функций интерфейсов программирования приложений операционных систем семейств Microsoft Windows [77, 78].

Программный комплекс состоит из следующих модулей: интерактивного графического препроцессора, модуля расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности и классификации элементов СТС, модуля расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, модуля расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.

Для более быстрого и удобного ввода данных в программном комплексе реализован графический ввод данных. Графический ввод данных необходим для представления СТС, например мостов, путепроводов, с помощью их геометрических моделей. Геометрические модели позволяют связать данные об СТС и ее элементах с их геометрическими прототипами.

На рисунке 5.1 представлена последовательность применения разработанных математических методов, алгоритмов и модулей программного комплекса.

Интерактивный графический препроцессор
Модуль программного комплекса расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности и классификации элементов СТС
Модуль программного комплекса расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами
Модуль программного комплекса расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект

Рисунок 5.1 – Последовательность применения разработанных математических методов, алгоритмов и модулей программного комплекса

5.1 Схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации

Применение разработанного программного комплекса позволяет построить схему управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации.

Управление техническим состоянием СТС состоит из этапов, представленных на рисунке 5.2.

На первом этапе из результатов обследований и исходных данных, полученных от уполномоченных организаций и экспертов, формируется набор входных параметров для последующих этапов.

На втором этапе по обработанным данным обследований для каждого элемента СТС рассчитываются свои параметры функции отказов $F(t)$ и определяется своя функция надежности $\bar{F}(t)$.

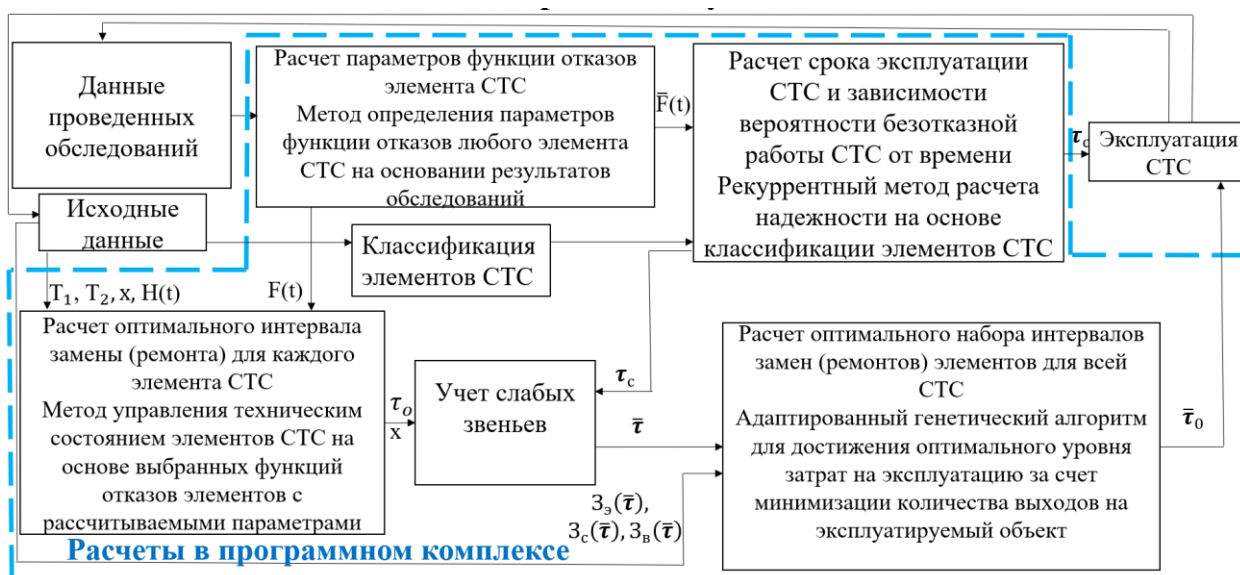


Рисунок 5.2 – Этапы управления техническим состоянием ТС

На следующем этапе по найденным функциям надежности $\bar{F}(t)$ и заданной классификации элементов с помощью рекуррентного метода рассчитывается зависимость вероятности безотказной работы ТС от времени и время τ_c , при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т.е. срок эксплуатации ТС.

Далее по заданным исходным данным и рассчитанным параметрам функции отказов $F(t)$ производится расчет оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента ТС с помощью метода управления техническим состоянием элементов ТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Затем производится учет слабых звеньев, которые заменяются (ремонтируются) раньше рассчитанного оптимального интервала с целью обеспечения надежности всей системы в целом. В результате получается набор оптимальных интервалов замен (ремонтов) для всех элементов ТС $\bar{\tau}$.

На следующем этапе производится расчет оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей ТС с применением генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. В результате получается оптимальный набор интервалов $\bar{\tau}_0$,

обеспечивающий минимум затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

На последнем этапе принимается решение о сокращении или продлении времени эксплуатации СТС на основании рассчитанного τ_c , до очередного ремонта в соответствии с рассчитанным оптимальным набором \bar{t}_0 .

Далее в процессе эксплуатации производятся замены, ремонты и новые обследования, в результате которых меняются и уточняются исходные данные и входные параметры и все расчеты производятся заново.

5.2 Интерактивный графический препроцессор для формирования графической модели СТС

Основное окно графического препроцессора представлено на рисунке 5.3.

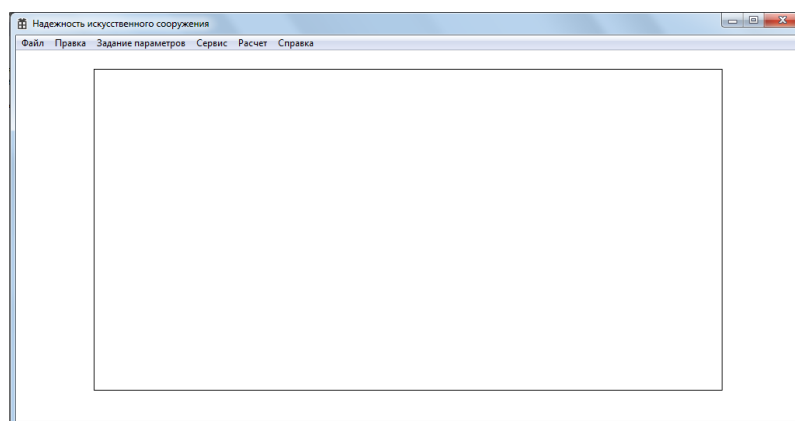


Рисунок 5.3 - Основное окно программного комплекса

При выборе меню «Файл», появляется выпадающее меню, изображенное на рисунке 5.4, в котором доступны следующие пункты:

- Создать новый.
- Загрузить.
- Сохранить.
- Выход.

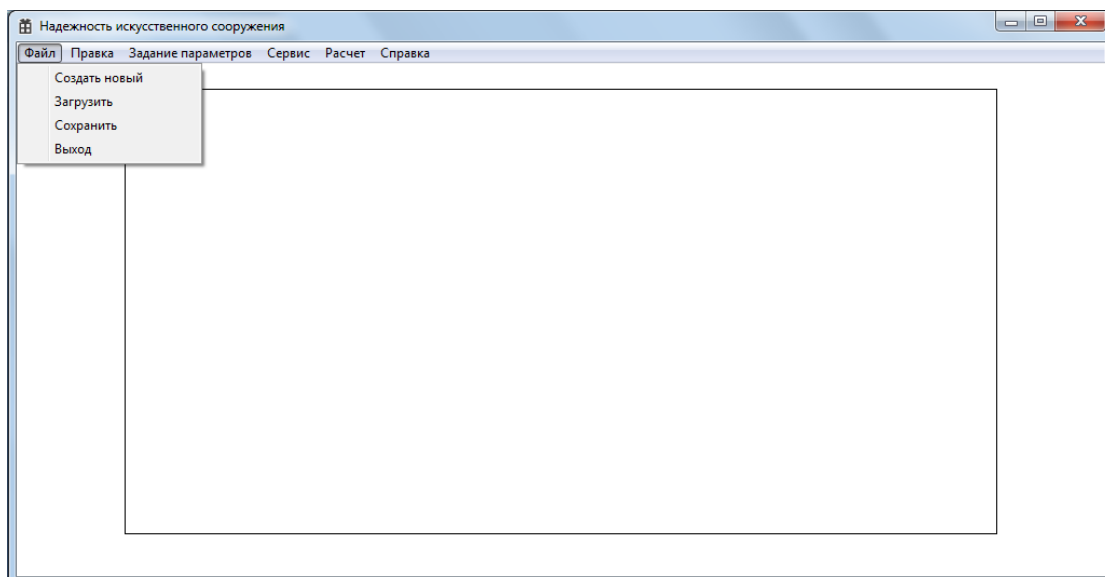


Рисунок 5.4 – Выпадающее меню «Файл»

При выборе пункта меню «Создать новый» появляется чистый лист, на котором в дальнейшем генерируется модель СТС.

При выборе пункта меню «Сохранить» начерченная геометрическая модель сохраняется в файле .dat.

При выборе пункта меню «Загрузить» выдается стандартное системное окно позволяющее загрузить данный файл.

При выборе пункта меню «Выход» мы видим диалоговое окно, изображенное на рисунке 5.5.

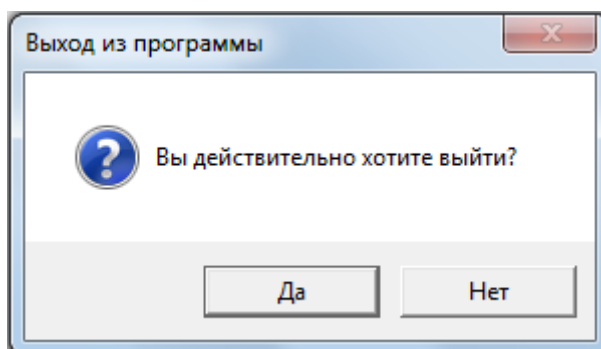


Рисунок 5.5 - Пункт меню «Выход из программы»

При выборе пункта меню «Сетка» из выпадающего меню «Сервис» на главном окне появляется сетка. В выпадающем меню появляется отметка, свидетельствующая о том, что данная команда активирована. При повторном выборе сетка с экрана исчезает. Сетка позволяет осуществить привязку узлов

конструкции к узлам сетки для более быстрого и точного задания геометрической модели системы. Сетка показана на рисунке 5.6.

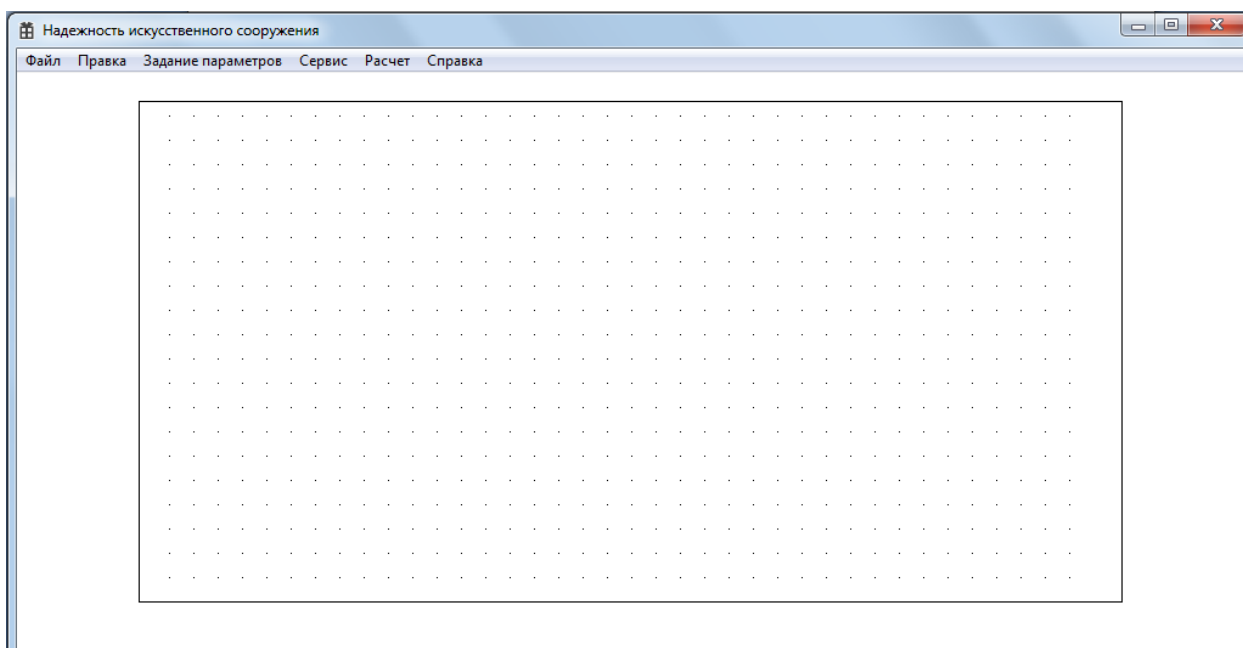


Рисунок 5.6 - Сетка для построения геометрической модели

В программном комплексе реализована возможность пользовательского задания цвета: окну, элементам, узлам, выделениям узлов, что показано на рисунке 5.7.

При выборе одной из команд пользовательского цвета появляется стандартное диалоговое окно выбора цвета, представленное на рисунке 5.7. В основном окне цвет меняется на цвет, выбранный пользователем.

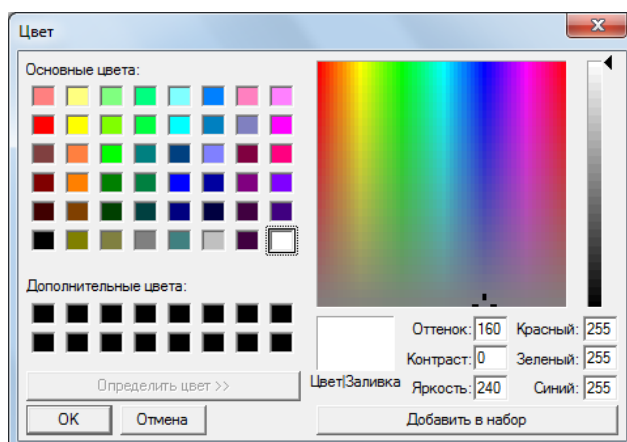


Рисунок 5.7 - Диалоговое окно «Цвет»

Для того чтобы построить схему СТС вводятся узлы. Для более быстрого построения схемы СТС, например искусственного сооружения, узлы вводят, опираясь на привязку к сетке, как представлено на рисунке 5.8.

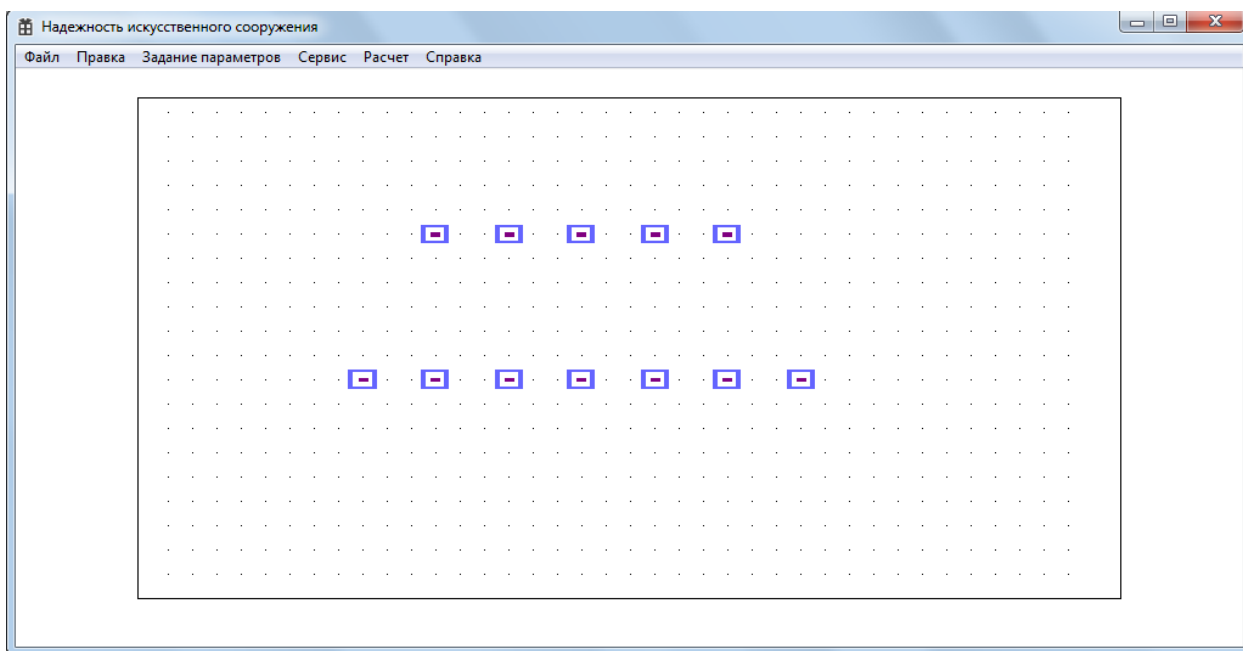


Рисунок 5.8 - Основное окно. Узлы СТС

Каждому элементу СТС, например искусственному сооружению присваивается номер, который отображается посередине элемента. Номера элементов изображены на рисунке 5.9.

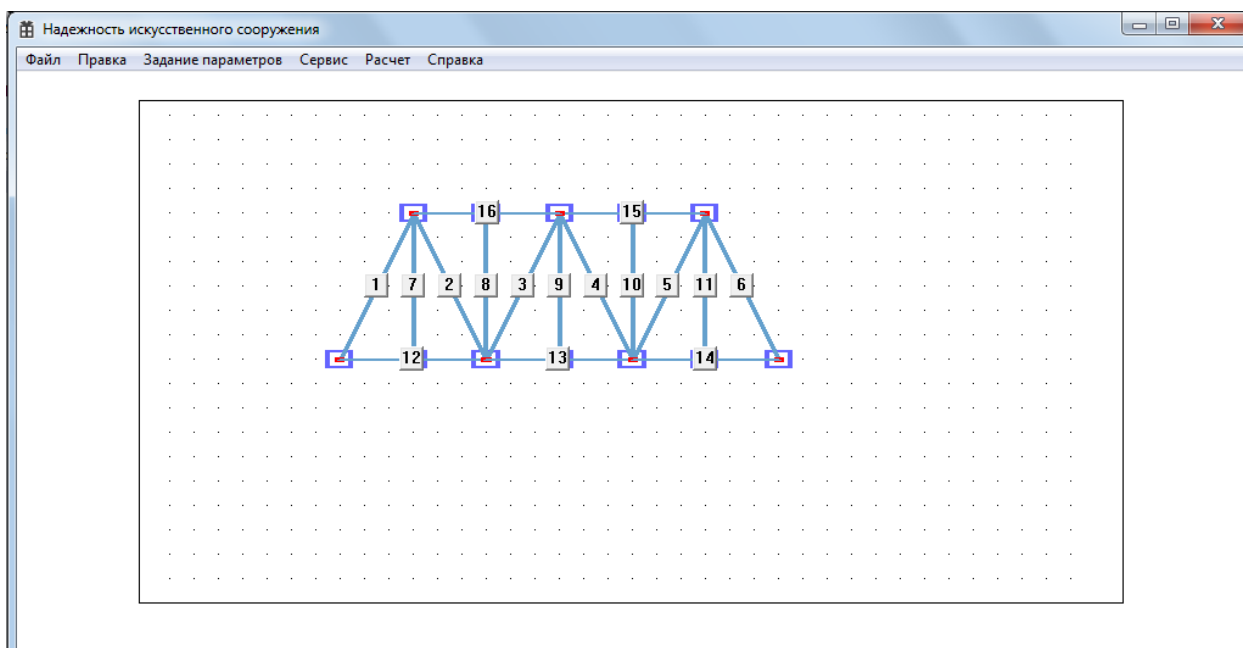


Рисунок 5.9 - Модель СТС

5.3 Модуль программного комплекса расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности и классификации элементов СТС

Расчетный модуль [13], в котором реализован рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени, считывает данные из трех файлов с расширением .dat.:

- файл, в котором записана матрица, показывающая без каких конгломерирующих элементов система станет неработоспособной, которую назовем матрицей связности элементов;

- файл, в котором записана матрица параметров $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ закона распределения для каждого элемента;

- файл, в котором записана матрица коэффициентов критичности α и групповой конгломерации β .

По заранее найденным функциям надежности $\bar{F}(t)$ и заданной классификации элементов в этом модуле программного комплекса с помощью рекуррентного метода рассчитывается зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени и время τ_c , при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т.е. срок эксплуатации СТС.

5.4 Модуль программного комплекса расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами

Расчетный модуль [17], в котором реализован алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, считывает данные из трех файлов с расширением .dat следующие параметры для каждого элемента:

- масштабный параметр и параметр формы для функции распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами $F(t)$;
- средняя длительность плановой предупредительной замены или ремонта T_1 ;
- средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта T_2 ;
- интервал безотказности x .

После считывания исходных данных решается интегро-дифференциальное уравнение, рассмотренное в главе 2, с использованием численного метода.

Результат расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС с помощью метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, записывается в файл с расширением .dat.

5.5 Модуль программного комплекса расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект

При использовании генетического алгоритма применяются модернизированные операторы: гибридная селекция, включающая помимо

метода выборной рулетки, элитарный отбор и отбор усечением; гибридный кроссинговер, включающий помимо одноточечного кроссинговера метод кроссинговера с уменьшением замены; гибридная мутация, включающая помимо точечной мутации метод мутации с вероятностью [15, 24-26].

Расчетный модуль, в котором реализован генетический алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект, считывает следующие данные:

- набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС: $\bar{\tau} = (\tau_1 \dots \tau_n)$;
- n - количество элементов СТС;
- $Z_3(\bar{\tau})$ - стоимость замен (ремонтов) элементов СТС;
- $Z_c(\bar{\tau})$ - затраты на выезд специалистов для замен (ремонтов) элементов;
- $Z_b(\bar{\tau})$ - стоимость времени работы элементов, которые были заменены раньше времени своей оптимальной замены.

Результатом расчета является оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов в соответствии с заданной целевой функцией, обеспечивающий минимум затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

5.6 Преимущества программного комплекса расчета надежности СТС

1. Разработанный программный комплекс «Надежность СТС» имеет следующие преимущества:

1.1. Основан на различных вероятностных методах и алгоритмах:

1.1.1. методе расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;

1.1.2. рекуррентном методе расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности

безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени;

1.1.3. методе управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранного закона распределения с рассчитываемыми параметрами функций отказов, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) каждого элемента;

1.1.4. генетическом алгоритме для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.

1.2. Состоит из взаимосвязанных модулей:

1.2.1. интерактивного графического препроцессора для формирования графической модели СТС;

1.2.2. модуля расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени;

1.2.3. модуля расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС;

1.2.4. модуля расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС.

1.3. позволяет построить схему эксплуатации СТС на весь период с учетом произведенных ремонтов или замен;

1.4. позволяет уточнять расчеты при проведении последующих обследований СТС;

1.5. обладает удобным пользовательским интерфейсом.

2. Созданный в диссертационной работе программный комплекс является основой управления техническим состоянием СТС и может быть эффективно использован во всех организациях, эксплуатирующих СТС, а также в проектно-строительных организациях любой отрасли.

6 АДАПТАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

6.1 Технология применения разработанных алгоритмов на высокопроизводительной параллельной вычислительной системе

Для того чтобы рассчитать с высокой точностью надежность СТС и прогнозировать ее изменение необходимо обработать большие объемы данных. Если эти данные обрабатываются последовательно, затрачивается большое количество времени. Для того чтобы сократить время выполнения программы эти данные могут быть обработаны параллельно с помощью наиболее распространенной технологии для распараллеливания алгоритмов MPI [18, 79]. Интерфейс MPI поддерживает создание параллельных программ в стиле Multiple Instruction multiple data (MIMD), что подразумевает объединение процессов с различными исходными текстами. Однако, писать и отлаживать такие программы очень сложно, поэтому на практике программисты гораздо чаще используют Single Instruction multiple data – (SIMD) параллельного программирования, в рамках которой для всех параллельных процессоров используется один и тот же код. Поэтому именно SIMD-модель применяется для распараллеливания алгоритмов расчета надежности СТС.

Основным способом взаимодействия параллельных процессов в High Performance Systems (HPS) системах является передача сообщений друг другу. Это и отражено в названии данной технологии – Message passing interface (MPI) [79]. Сообщение несёт в себе передаваемые данные и информацию, позволяющую принимающей стороне осуществлять их выборочный приём:

- отправитель — ранг (номер в группе) отправителя сообщения;
- получатель — ранг получателя;

— идентификатор — идентификатор сообщения может использоваться для разделения различных видов сообщений;

— коммуникатор — код группы процессов.

Основной механизм связи между процессами в MPI - передача данных между парой взаимодействующих процессов: одним - посылающим, другим - получающим. Эта связь называется point-to-point. MPI обеспечивает набор функций передачи и приема данных, допускающих пересылку типов. Для этого вводится понятие тега, с помощью которого связывают тип данных непосредственно с данными и их представлением. Информация о типе необходима для правильного преобразования представления данных в разных архитектурах ЭВМ, поскольку взаимодействующие процессы могут выполняться на ЭВМ с различной архитектурой.

Имеются следующие базовые типы передающих и принимающих point-to-point операций: блокирующие и неблокирующие. Каждая передающая операция из этих типов имеет дополнительные подтипы: буферизированный, синхронный и по состоянию готовности.

Блокирующие операции гарантирует корректность повторного использования всех параметров после возврата из процедуры. Это означает, что после возврата из MPI_SEND можно использовать любые присутствующие в вызове данной процедуры переменные без опасения испортить передаваемое сообщение. Выбор способа осуществления этой гарантии: копирование в промежуточный буфер или непосредственная передача принимающему процессу, остается за разработчиками конкретной реализации MPI. Неблокирующие операции возвращают управление сразу после вызова без какой-либо остановки процесса. На фоне дальнейшего выполнения программы одновременно происходит и обработка асинхронно запущенной операции.

Рост увеличения скорости выполнения программы, распараллеленной для количества процессоров p , ограничен законом Амдала [18, 79]. Алгоритм расчета надежности СТС таков, что доля f от общего объема вычислений

может быть получена только последовательными расчётами, соответственно, доля $1 - f$ может быть хорошо распараллелена, то есть время вычисления будет обратно пропорционально числу задействованных узлов p . Тогда ускорение, которое может быть получено на вычислительной системе из p процессоров, по сравнению с однопроцессорным решением не будет превышать величины S_p , определяемой по следующей формуле:

$$S_p = \frac{1}{f + \frac{1-f}{p}}, \quad (6.1)$$

где f - доля от общего числа вычислений, которая может быть получена только последовательным расчетом,

p - число процессоров,

S_p - ускорение алгоритма при его выполнении на p процессорах.

Технология MPI может быть применена не только для суперкомпьютеров, но также распараллеливания программы для выполнения на нескольких ядрах. Современные компьютеры имеют от несколько ядер. При наличии 4 ядер с технологией Hyper-treading вычисления могут быть подразделены на 8 потоков, так как из 4 физических ядер образуются 8 логических. Для распараллеливания алгоритма на персональном компьютере на 8 ядрах используется библиотека MPICH2. MPICH2 – реализация стандарта MPI. Существуют версии этой библиотеки для всех популярных операционных систем, в том числе для ОС семейства Windows.

Таким образом, с учетом альтернативных вариантов, в следующем пункте будет произведено сравнение времени выполнения рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы и рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы с использованием MPI, запущенных на одинаковом количестве процессоров на персональном компьютере и на HPS - системе. Следует также учесть, что количество выполняемых процессов на персональном компьютере ограничено в нашем случае восемью, в то время как на HPS -

системе число процессов ограничивается заданным числом процессоров, на которых выполняется данный алгоритм.

Разработанная технология распараллеливания с использованием интерфейса MPI позволяет применять созданные алгоритмы в случае обработки большого объема данных для многоэлементной СТС в высокопроизводительной вычислительной системе.

6.2 Сравнение времени выполнения расчетов на однопроцессорном компьютере и высокопроизводительном параллельном компьютере

Наиболее выгодно по времени распараллеливать программы, которые легко масштабируются, т. е. обмен данными между процессами минимален. При добавлении процессоров в такие системы время расчета сокращается пропорционально количеству процессов.

Таким алгоритмом является алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения и рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени.

Измерим время необходимое для выполнения последовательного расчета по рекуррентному алгоритму расчета надежности всей сложной технической системы. Последовательный расчет надежности по рекуррентному алгоритму расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС, изложенному в статье [13], для моста, пропускающего через р. Нерусса, расположенного на 478 км

II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути на персональном компьютере занимает время $t=3616.74$ секунд.

Для распараллеливания рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС необходимо одному процессу дать считать исходные данные, чтобы не произошло коллизий при одновременном обращении к данным. Далее с помощью функции **MPI_Bcast()** необходимо разослать данные всем процессам. После необходимо разделить данные между процессами. Для этого необходимо с помощью функции **MPI_Comm_size()** определить число процессов в группе, а с помощью функции **MPI_Comm_rank()** определить номер процесса, на котором происходит обработка данных. Далее необходимо запустить цикл, в котором обрабатываемые данные определяются в соответствии с заданным временем или прошедшей нагрузкой и зависят от номера обрабатывающего их процесса:

```
for (int p = myid; p < kol_x; p+= numprocs)
{
...
}
```

где kol_x - заданное время или прошедшая нагрузка,

$myid$ - номер процесса, на котором происходит обработка данных,

$numprocs$ - количество процессов, обрабатывающих данные.

При параллельном выполнении данного алгоритма на суперкомпьютере «Ломоносов-2» на 40 процессах занимает время $t= 103.34$ секунд. Таким образом, добиваемся ускорения расчетов в 35 раз.

Для распараллеливания алгоритма оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами необходимо каждому процессу дать обработать одинаковое количество элементов СТС. Для этого необходимо с помощью функции **MPI_Comm_size()** определить число

процессов в группе, а с помощью функции **MPI_Comm_rank()** определить номер процесса, на котором происходит обработка данных. Далее необходимо запустить цикл, в котором номер обрабатываемого элемента будет зависеть от номера обрабатывающего его процесса:

```
for (int i = myid; i < kol; i+= numprocs)
    {
        ...
    }
```

где kol - количество элементов СТС,

myid - номер процесса, на котором происходит обработка данных,

numprocs - количество процессов, обрабатывающих данные.

Для того чтобы собрать результаты расчетов надежности, проведенных на каждом процессоре для определенного числа элементов, необходимо использовать функцию **MPI_Gather()**. Эта функция производит сборку блоков данных, посылаемых всеми процессами группы, в один массив процесса. Длина блоков предполагается одинаковой. Объединение происходит в порядке увеличения номеров процессов-отправителей. То есть данные, посланные процессом *i* из своего буфера, помещаются в *i*-ю порцию буфера процесса, в который данные отправляются. Затем данные выводятся на экран или в файл на данном процессе. Это делается для того, чтобы избежать коллизии, когда два или более процессов пытаются записать в файл или вывести на экран.

Последовательный расчет оптимального интервала с помощью метода расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе метода управления техническим состоянием СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами элементов моста, пропускающего *p*. Нерусса, расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути занимает время $t = 10.74$ секунды [10, 16].

Время выполнения данного алгоритма на персональном компьютере с 4 ядрами и 8 потоками составляет $t=3.43$ секунд. При выполнении этого же алгоритма на суперкомпьютере «Ломоносов-2» с использованием 8 ядер время составляет $t=2.1$ секунды. Таким образом, ускорение при распараллеливании на персональном компьютере достигается в 3.13 раз, а при выполнении на суперкомпьютере достигается в 5.11 раза.

Вычисления, производимые с помощью технологии MPI позволяют сократить затрачиваемое время. Расчет надежности технического состояния СТС, выполненный с помощью рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС, занимает часы, что делает актуальным использование параллельных вычислений.

В процессе эксплуатации СТС могут возникнуть ситуации, когда параллельные вычисления необходимы. Например, в случае проведения важных совещаний может потребоваться принятие решений в режиме реального времени. Параллельные вычисления могут также быть необходимы при существенном масштабировании задачи, например, для принятия решений при управлении эксплуатацией большого количества искусственных сооружений в регионе России или на железной дороге большой протяженности, такой как Москва-Владивосток.

Таким образом, параллельные вычисления, примененные к алгоритмам надежности, позволят своевременно и оперативно реагировать на изменения фактического технического состояния СТС.

7 СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ СТС

7.1 Расчет параметров функций отказов элемента СТС с учетом ранее проведенных ремонтов и обследований

Рассмотрим в качестве функции отказов элемента СТС функцию распределения Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tilde{\beta}}\right)^{\tilde{\alpha}}}, \quad (7.1)$$

где $\tilde{\alpha}$ – параметр формы и $\tilde{\beta}$ – масштабный параметр.

Результаты расчетов параметра формы и масштабного параметра для пролетного строения моста [80-83], пропускающего реку Нерусса, расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск Льговской дистанции пути, приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Результаты расчетов параметра формы и масштабного параметра

Элементы пролетного строения	$\tilde{\alpha}$ – параметр формы	$\tilde{\beta}$ – масштабный параметр
Элементы нижнего пояса	2	4,80531E-11
Элементы верхнего пояса	2	2,95944E-10
Продольные балки	2	2,71549E-10
Поперечные балки	2	2,71549E-10
Раскосы	2	3,73986E-11
Стойки	2	6,59427E-11

Продолжение таблицы 7.1

Элементы пролетного строения	$\tilde{\alpha}$ – параметр формы	$\tilde{\beta}$ – масштабный параметр
Подвески	2	6,59427E-11
Диагонали верхнего пояса	2	2,95944E-10
Распорки верхнего пояса	2	2,95944E-10
Диагонали нижнего пояса	2	2,95944E-10

7.2 Расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС

Для разнородных типов элементов металлического пролетного строения моста, пропускающего реку Нерусса, расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянской дистанции пути, рассчитаны оптимальные интервалы замен (ремонтов) этих элементов [17]. Зависимость оптимального интервала от интервала безотказности для разнородных типов элементов металлического пролетного строения представлена на рисунке 7.1.

Для разнородных типов элементов металлического пролетного строения моста, пропускающего р. Снежеть 375/4 км (четные пути) Брянской дистанции пути, рассчитаны оптимальные интервалы замены этих элементов. Зависимость оптимального интервала от интервала безотказности для разнородных типов элементов металлического пролетного строения представлена на рисунке 7.2.

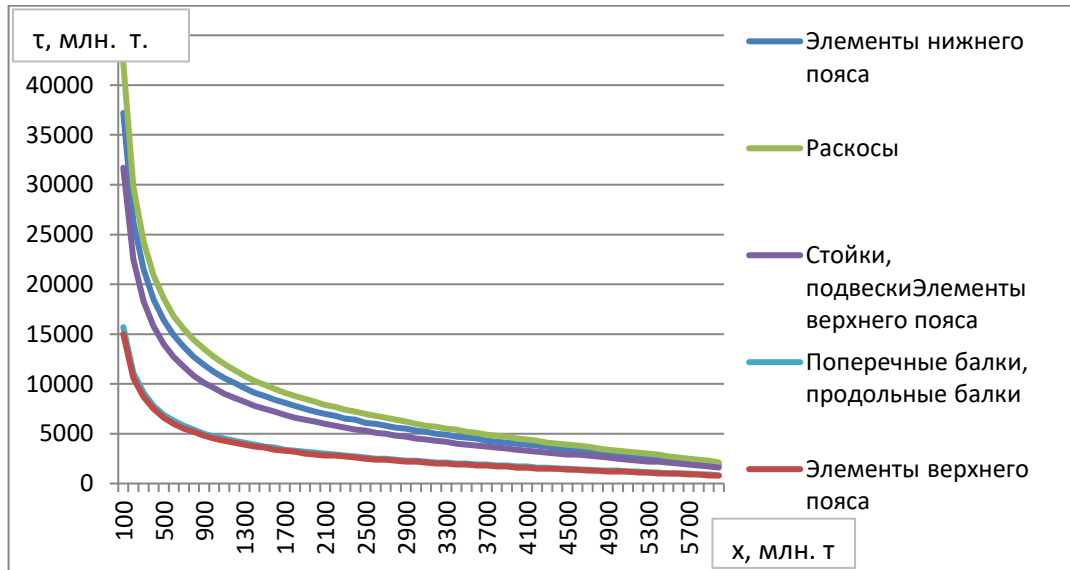


Рисунок 7.1 - Зависимость оптимального интервала τ_i от интервала безотказности x_i для моста, пропускающего р. Нерусса

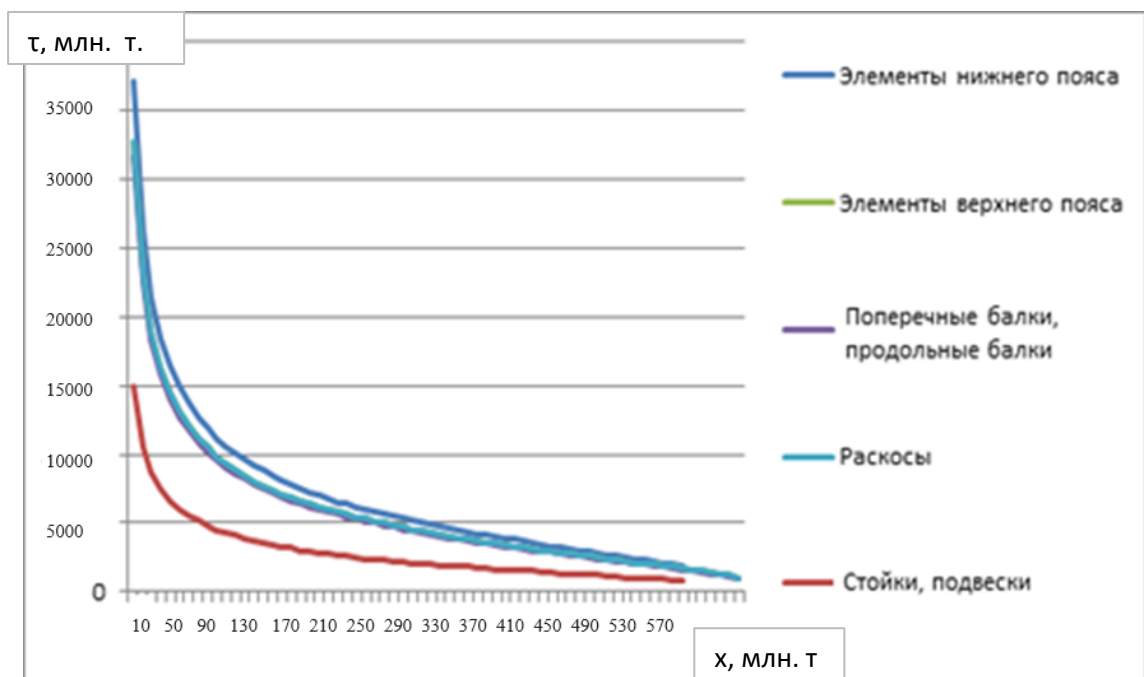


Рисунок 7.2 - Зависимость оптимального интервала τ_i от интервала безотказности x_i для моста, пропускающего р. Снежеть

7.3 Расчеты срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности на основе классификации элементов

Изложенный рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени был реализован в одном из программных модулей программного комплекса «Надежность СТС».

В программном комплексе были произведены расчеты надежности пролетного строения моста, пропускающего реку «Нерусса», расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути. Пролетные строения этого моста металлические с ездой понизу проектировки Гипротранса НКПС 1931 г., под расчетную нагрузку Н-7. Расчетная схема пролетного строения данного моста 2x88м представлена на рисунке 7.3.

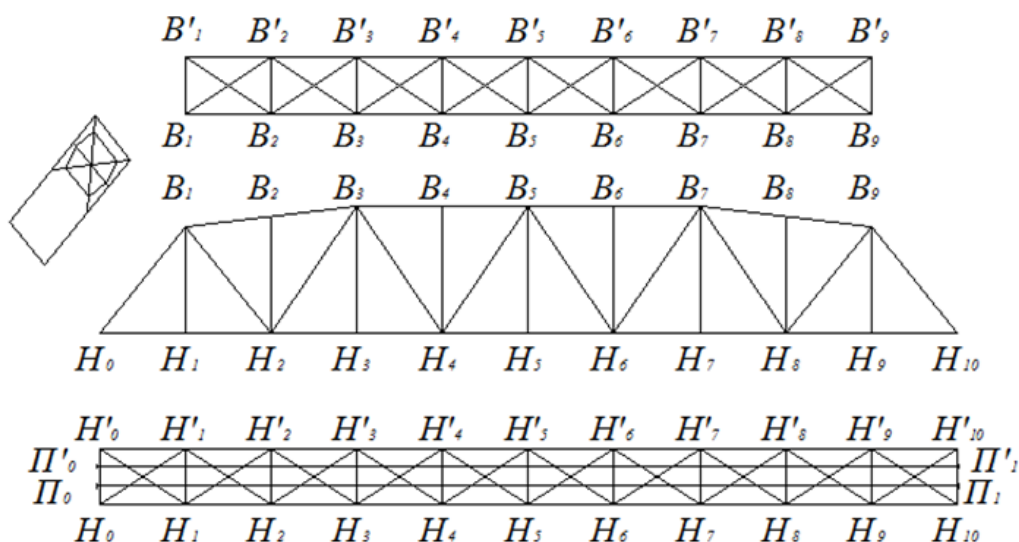


Рисунок 7.3 - Схема пролетного строения $L_p = 88$ м

Полученный в результате расчета на основе рекуррентного метода расчета надежности с использованием классификации элементов график

зависимости вероятности безотказной работы от времен для пролетного строения моста, пропускающего реку «Нерусса» представлен на рисунке 7.4

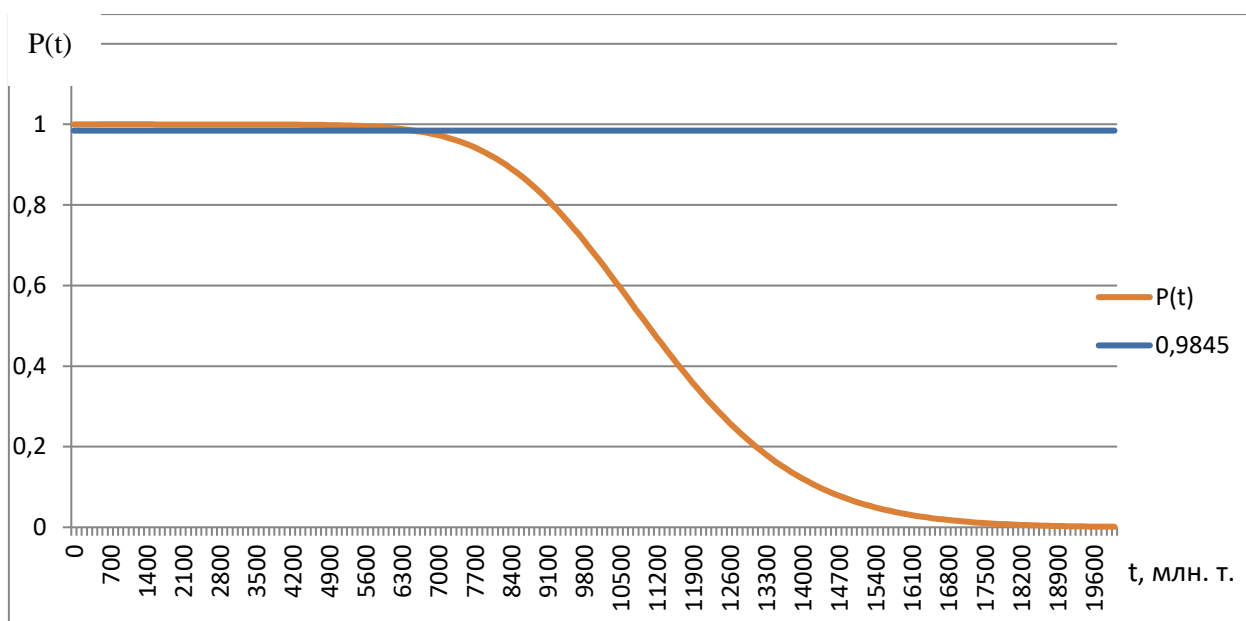


Рисунок 7.4 - Зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени для моста, пропускающего р. Нерусса

Из анализа данного графика, представленного на рисунке 7.4, можно заключить, что пропущенная нагрузка при вероятности безотказной работы $P=0.9845$ составляет 6536 млн. т. Следовательно, после пропуска 6536 млн. т необходимо либо заменить пролетное строение, либо найти элементы, срок работы которых оказался меньше остальных и заменить или отремонтировать их. Для определения оптимального времени замены элементов пролетного строения используется метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, описанный в статье [17].

Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Нормативный срок замены пролетного строения, рассматриваемого сооружения, составляет 60 лет. Если этот нормативный срок для данного искусственного сооружения выразить в единицах пропущенной нагрузки, то он будет составлять 3999 млн. т. Проведенные расчеты для этого же

искусственного сооружения дают предельный срок эксплуатации, выраженный в единицах пропущенной нагрузки, 6536 млн. т.

Таким образом, срок эксплуатации может быть продлен на 2537 млн. т., т. е., при той же интенсивности движения, приблизительно на 38 лет.

Изложенный подход позволяет проводить расчеты вероятности безотказной работы искусственных сооружений с учетом фактического технического состояния, особенностей предыдущей эксплуатации, проведенных обследований, замен и ремонтов элементов, а также прогнозировать ее изменение.

На основании результатов расчетов по изложенной методике можно принимать решение о сокращении или продлении срока эксплуатации искусственных сооружений с учетом интенсивности движения на данном участке пути. Это позволит осуществлять обоснованное управление техническим состоянием искусственных сооружений.

7.4 Схема управления техническим состоянием моста, пропускающего реку «Нерусса», расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути

Построим схему управления техническим состоянием на весь период эксплуатации моста, пропускающего реку «Нерусса», расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути. Мост имеет металлические пролетные строения с ездой понизу проектировки Гипротранса НКПС 1931 г., под расчетную нагрузку Н-7.

Рассчитанный по рекуррентному методу срок эксплуатации металлического пролетного строения моста, пропускающего реку «Нерусса», составляет $\tau_c = 6536$ млн. т при вероятности безотказной работы $P=0.9845$, что представлено на рисунке 7.4.

Для различных типов элементов металлического пролетного строения рассматриваемого моста рассчитаны оптимальные интервалы замены этих

элементов. Зависимость оптимального интервала от интервала безотказности для различных типов элементов металлического пролетного строения представлена на рисунке 7.1.

Из элементов, для которых рассчитаны оптимальные интервалы замены, выбраны элементы с наименьшими оптимальными интервалами. Такими элементами являются элементы верхнего пояса, оптимальный интервал замен для которых равен $\tau_{min} = 6000$ млн. т при интервале безотказности $x_{min} = 600$ млн. т.

Таким образом, интервал замены металлического пролетного строения, то есть всей системы, $\tau_c = 6536$ млн. т меньше наименьшего интервала $\tau_{эmin}$, равному сумме $\tau_{min} = 6000$ млн. т и $x_{min} = 600$ млн. т. Следовательно, оптимальный интервал для элементов верхнего пояса необходимо уменьшить на время равное $\tau = 6600 - 6536 = 64$ млн. т. Таким образом начать ремонт элементов верхнего пояса металлического пролетного строения необходимо через время равное $\tau_{min} = 6000 - 64 = 5936$ млн. т.

После учета слабых звеньев моста, расположенного через реку Нерусса 478 км II пути участка Брянск-Суземка, с помощью программного комплекса «Надежность СТС» был произведен расчет оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов этого моста на основе применения генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.

За 30 лет эксплуатации по регламенту планировалось осуществить 50 выездов на объект для замены или ремонтов элементов. За счет применения генетического алгоритма для этого искусственного сооружения количество выездов на объект можно сократить до 20, а за счет синхронизации – уменьшить еще на два, что в общем итоге сократит количество выездов до 18, т.е. на 64%. Это приведет к снижению издержек на эксплуатацию данной сложной технической системы на 24%, т.е. принесет существенный экономический эффект при условии обеспечения заданного уровня надежности.

Поставленная задача оптимизации замен (ремонтов) элементов СТС в процессе ее эксплуатации с использованием разработанного программного комплекса «Надежность СТС» решена следующим образом.

В результате решения первой части задачи оптимизации была построена совокупность оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС. Для этого использовались: метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, изложенный в параграфе 2.4; рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС, изложенный в параграфе 2.3; алгоритмы, построенные на их основе и изложенные в главе 4, а также программный комплекс, описанный в главе 5.

Вторая часть задачи оптимизации решена с помощью генетического алгоритма. Результатом решения задачи является оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС, который обеспечивает минимум целевой функции, определяемой затратами в процессе эксплуатации, с учетом ограничений на оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС, которые обеспечивают заданный уровень надежности. Таким образом достигается максимальный экономический эффект при заданном уровне надежности.

Построенный метод оптимизации замен (ремонтов) элементов можно применить для ряда СТС, в качестве которых рассматриваются искусственные сооружения, например мостовые конструкции, находящиеся в непосредственной близости друг от друга. В этом случае будут происходить оптимальные замены или ремонты сразу нескольких элементов на различных искусственных сооружениях, что даст дополнительную экономию.

Предложенная схема управления техническим состоянием пролетного строения позволяет с большой точностью рассчитывать надежность пролетного строения и прогнозировать ее изменения, гибко реагировать на изменение эксплуатационных условий, а также осуществлять оптимальное управление по критерию «надежность-затраты».

7.5 Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста

Данные обследований искусственных сооружений были предоставлены дорожными центрами диагностики при участии мостовых мастеров путевых частей.

Приведем зависимости износа от времени работы для элементов пролетных строений следующих металлических мостов:

– мост через р. Вабля 42км ПК4 участка Унеча-Хутор Михайловской Унечской дистанции пути. Осмотр произведен 15 апреля 2009 года.

– мост через р. Снежень 375/4 км Брянской дистанции пути. Пролетные строения металлические, клепаные по проекту ПСК, изготовленные в 1946 году, установлены в 1947г. Под расчетную нагрузку Н-7. Осмотр произведен 22 августа 2007 года.

– мост через р. Нерусса 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути. Осмотр произведен 19-21 мая 2009 г.

На рисунке 7.5 представлены графики функций износа элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Снежень 375/4 км Брянской дистанции пути, в которых были обнаружены дефекты.

Для элемента рыбака наработка, при которой наступает отказ при $\tilde{\alpha}=4$ равна $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-1}{4}\right)} \approx 0,5276$, для остальных элементов наработка, при которой наступает отказ при $\tilde{\alpha}=7$ равна $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-1}{7}\right)} \approx 0,5756$. При заданном износе $F^*(t_0)$ в определенный момент времени t_0 и при фиксированном $\tilde{\alpha}$ коэффициент $\tilde{\beta}$ функции Вейбулла находится из уравнения:

$$F(t_0) = 1 - e^{-\left(\frac{t_0}{\tilde{\beta}}\right)^{\tilde{\alpha}}} . \quad (7.2)$$

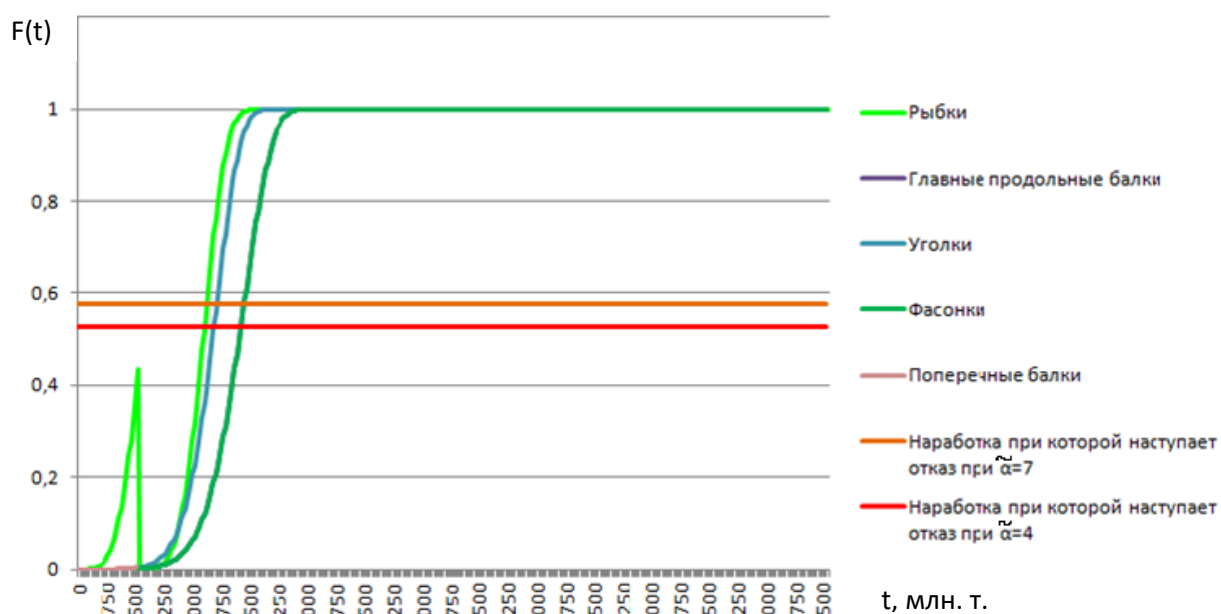


Рисунок 7.5 - Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Снежеть 375/4 км

Анализ приведенных графиков позволяет сделать следующие выводы. Проектный срок службы для накладок типа «рыбка» составляет $T_n = 30$ лет. Результаты, полученные по предлагаемому методу прогнозирования износа позволяют продлить фактический срок службы до $T_\phi = 31$ года. Проектный срок службы для главных продольных балок пролетного строения составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 81$ год. Проектный срок службы для главных продольных балок пролетного строения составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 81$ год. Проектный срок службы для главных продольных балок пролетного строения составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 62$ года.

На рисунке 7.6 представлены графики функций износа для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Вабля 42 км

ПК4 участка Унеча-Хутор Михайловской Унечской дистанции пути, в которых были обнаружены дефекты.

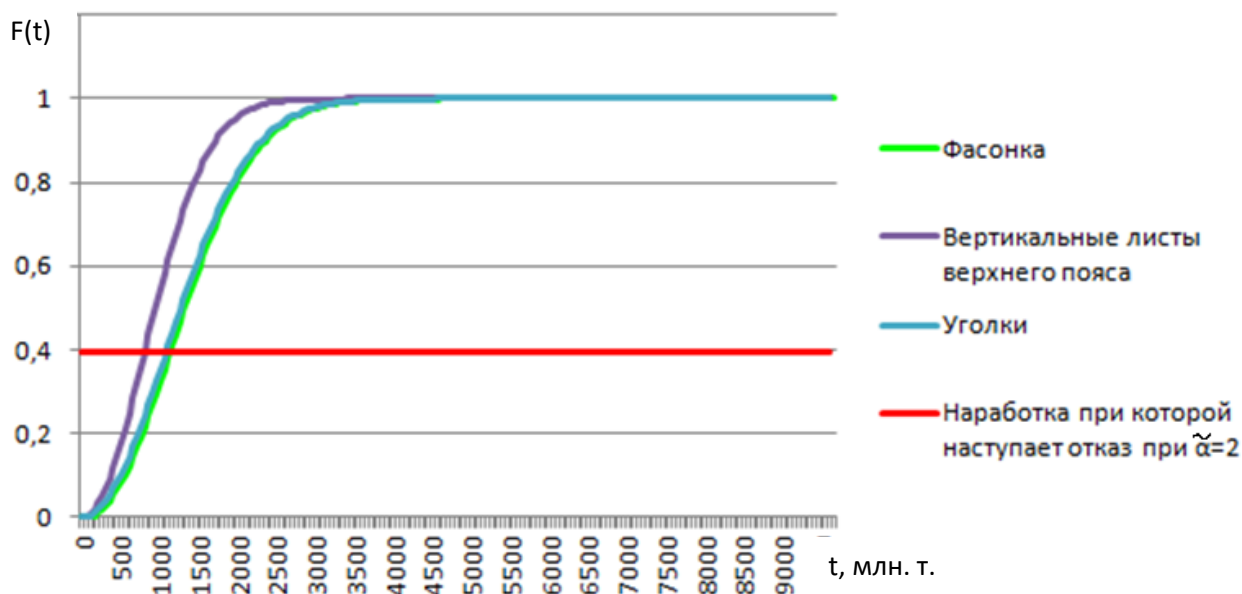


Рисунок 7.6 - Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Вабля 42км

Для исследуемых элементов наработка, при которой наступает отказ при $\tilde{\alpha}=4$ равна $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{2-1}{2}\right)} \approx 0,3935$.

Проектный срок службы вертикальных листов верхнего пояса составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 63$ года.

На рисунке 7.7 представлены графики функций износа для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Нерусса 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути, в которых были обнаружены дефекты.

Для исследуемых элементов наработка, при которой наступает отказ при $\tilde{\alpha}=7$ равна $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{2-1}{2}\right)} \approx 0,5756$.

Проектный срок службы поперечных балок составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемой методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 63,4$ года.

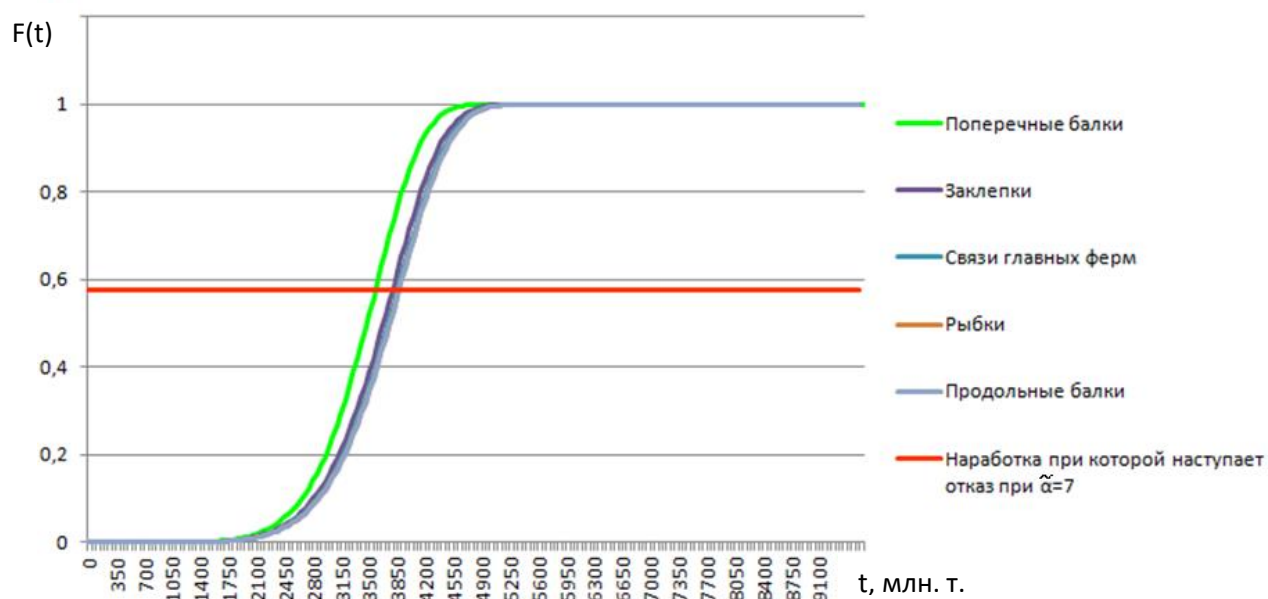


Рисунок 7.7 - Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Нерусса 478 км II пути

Проектный срок службы поперечных балок составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 69$ лет. Проектный срок службы поперечных балок составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемому методу прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_\phi = 57$ лет.

Таким образом, предлагаемый метод прогнозирования износа позволяет обосновано принимать решение о продлении ресурса искусственных сооружений, т. е. сокращении эксплуатационных затрат, при условии обеспечения заданной надежности. Следовательно, применение предлагаемого метода позволит эксплуатировать искусственные сооружения по критерию – «надежность – затраты», т. е. обеспечить максимум надежности при условии минимума затрат.

7.6 Расчеты меры повреждения и вероятности безотказной работы для поездов I, II, III типов

Для поездов I типа длина приемно-отправочных путей составляет $L_{\text{проп}} = 850$ м, а длины вагонов по осям сцепления автосцепок примем $l_{\text{в}} = 16,75$ м.

Для поездов I типа $Z_{\text{в}}$ определяется по формуле (2.57):

$$Z_{\text{в}} = \frac{850}{16,75} \approx 48 \text{ вагонов состава поезда I типа.}$$

Нагрузка от одного поезда I типа $P_{\text{п}}$ вычисляется по формуле:

$$P_{\text{п}} = 8 \cdot 24 + 6,5 \cdot 16,75 \cdot 48 = 5418 \text{ т.} \quad (7.3)$$

Для определения средней нагрузки на ось поезда I типа $P_{\text{со}}$ воспользуемся формулой:

$$P_{\text{со}} = \frac{5418}{(8+8 \cdot 48)} = 13,82142857 \text{ т.} \quad (7.4)$$

Для определения меры повреждения ν' от одного поезда I типа воспользуемся таблицей, приведенной в [69, 70]. По таблице находим значение меры повреждения, при которой обеспечивается заданная надежность, получаем $\nu_{\text{он}}=0,3$. Тогда из формулы (2.63) и данных таблиц, можно вычислить:

$$\nu' = \frac{0,3 - 0,0891}{1630} = 0,000129387. \quad (7.5)$$

Мера повреждения от 1 тонны поезда I типа $\nu'_{\text{т}}$ определяется с помощью формулы:

$$\nu'_{\text{т}} = \frac{0,000129387}{5418} = 2,38809 \cdot 10^{-8}. \quad (7.6)$$

Для поездов II типа длина приемно-отправочных путей составляет $L_{\text{проп}} = 850$ м, а длины вагонов по осям сцепления автосцепок примем $l_{\text{в}} = 16,7$ м.

Для поездов II типа $Z_{\text{в}}$ определяется по формуле (2.57):

$$Z_{\text{в}} = \frac{850}{16,75} \approx 48 \text{ вагонов состава поезда II типа.}$$

Нагрузка от одного поезда II типа P_{II} вычисляется по формуле (2.58):

$$P_{II} = 8 \cdot 27 + 10,5 \cdot 16,75 \cdot 48 = 8658 \text{ т.} \quad (7.7)$$

Для определения средней нагрузки на ось поезда II типа P_{co} воспользуемся формулой (2.59):

$$P_{co} = \frac{8658}{(8 + 8 \cdot 48)} = 22,08673469 \text{ т.} \quad (7.8)$$

Для определения меры повреждения от одного поезда II типа v' воспользуемся таблицей, приведенной в монографии Осипова [69, 70]. По таблице находим значение меры повреждения, при которой обеспечивается заданная надежность, получаем $v_{он}=0,3$. Тогда из формулы (2.63) и данных таблиц, приведенных в монографии Осипова, можно получить:

$$v' = \frac{0,3 - 0,0891}{143} = 0,001474825. \quad (7.9)$$

Мера повреждения от 1 тонны поезда II типа v'_T определяется с помощью формулы (2.63):

$$v'_T = \frac{0,001474825}{8658} = 1,70342 \cdot 10^{-7}. \quad (7.10)$$

Отношение нагрузки поезда II типа к нагрузке поезда I типа C_{II-I} вычисляется с помощью формулы (2.60):

$$C_{II-I} = \frac{22,08673469}{13,82142857} = 1,598006645. \quad (7.11)$$

Для поездов III типа длина приемно-отправочных путей составляет $L_{проп} = 1050$ м, а длины вагонов по осям сцепления автосцепок примем $l_B = 16$ м.

Для поездов III типа Z_B определяется по формуле (2.57):

$$Z_B = \frac{1050}{16} \approx 65 \text{ вагонов состава поезда III типа.}$$

Нагрузка от одного поезда III типа P_{III} вычисляется по формуле (2.58):

$$P_{II} = 8 \cdot 30 + 27 \cdot 16,75 \cdot 48 = 14280 \text{ т.} \quad (7.12)$$

Для определения средней нагрузки на ось поезда III типа P_{co} воспользуемся формулой (2.59):

$$P_{co} = \frac{14280}{(8 + 8 \cdot 65)} = 27,04545455 \text{ т.} \quad (7.13)$$

Отношение нагрузки на ось поезда III типа к нагрузке на ось поезда II типа $C_{HIII-II}$ вычисляется с помощью формулы (2.61):

$$C_{HIII-II} = \frac{27,04545455}{22,08673469} = 1,224511225. \quad (7.14)$$

Мера повреждения элемента от поезда III типа v'_{III} вычисляется с помощью формулы (2.64):

$$v'_{III} = (1,70342 \cdot 10^{-7} - 2,38809 \cdot 10^{-8})1,224511225 \cdot 1,598006645 + 2,38809 \cdot 10^{-8} = 3,1047360 \cdot 10^{-7}. \quad (7.15)$$

Примем типичный вариант эксплуатации железнодорожного моста в течение длительного времени, заключающийся в том, что прошло 700 тыс. поездов I типа, 700 тыс. поездов II типа и далее пошли поезда III типа. На основе приведенных выше формул получены зависимости меры повреждения от нагрузки, соответствующей определенному эталонному поезду, для разнородных элементов мостов. Эти зависимости представлены на рисунках 7.8 – 7.15.

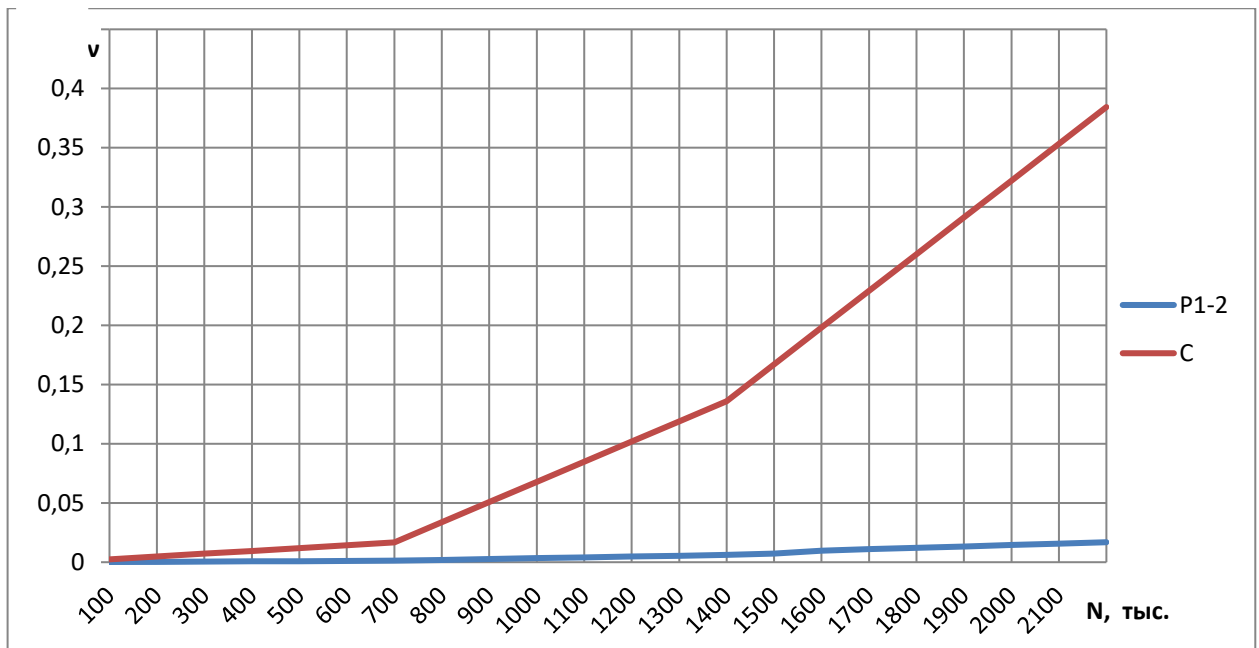


Рисунок 7.8 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 33 м

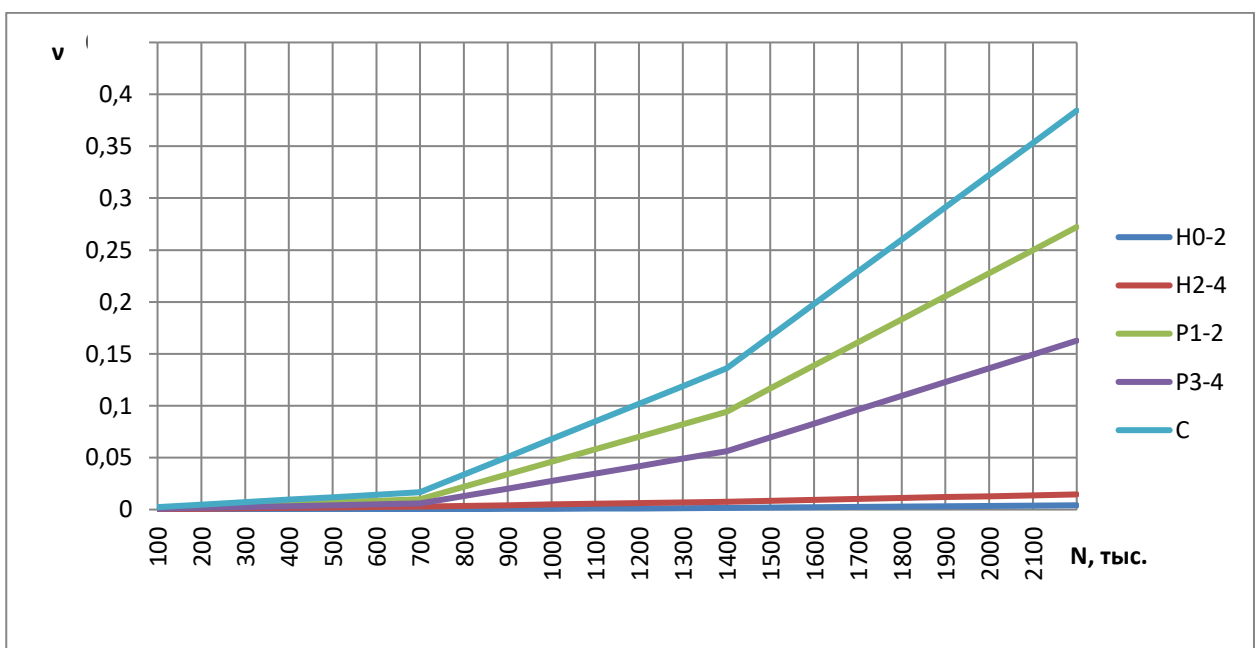


Рисунок 7.9 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 44 м

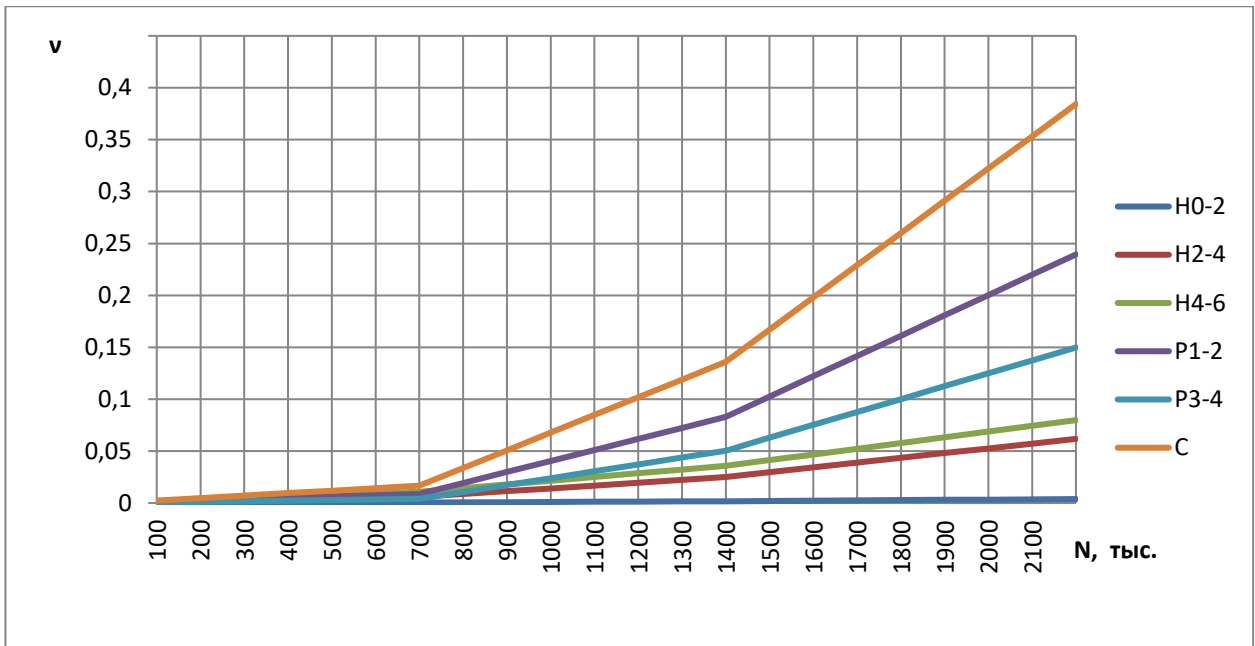


Рисунок 7.10 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 55 м

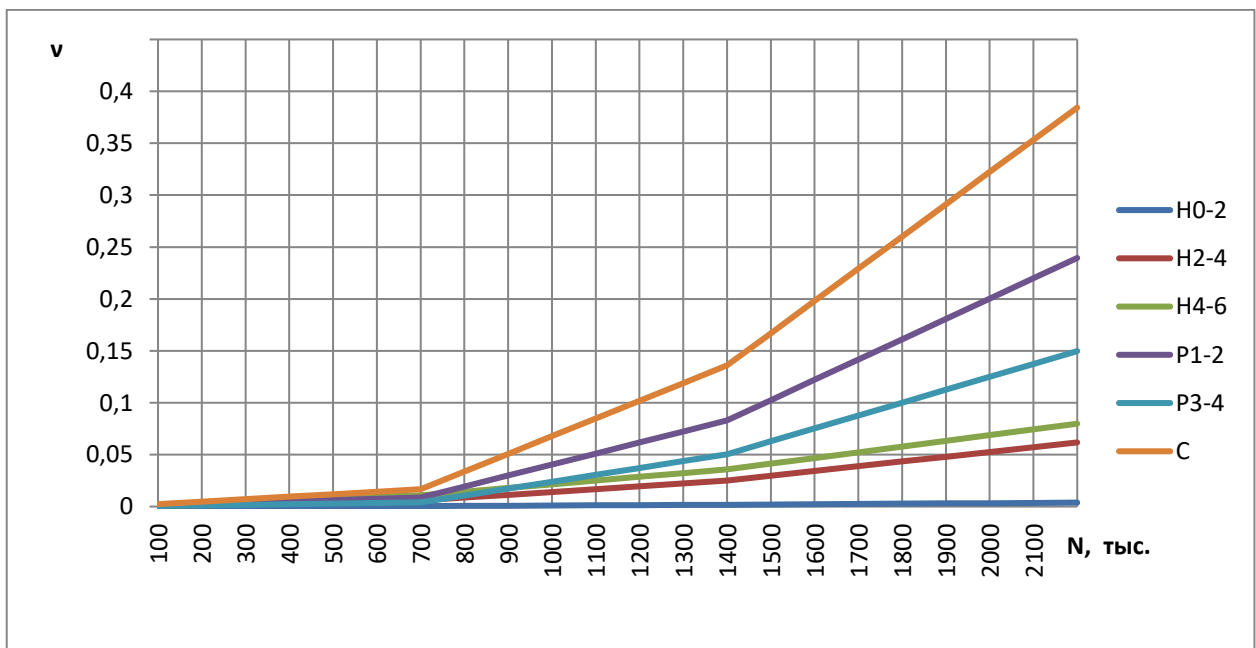


Рисунок 7.11 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 66 м

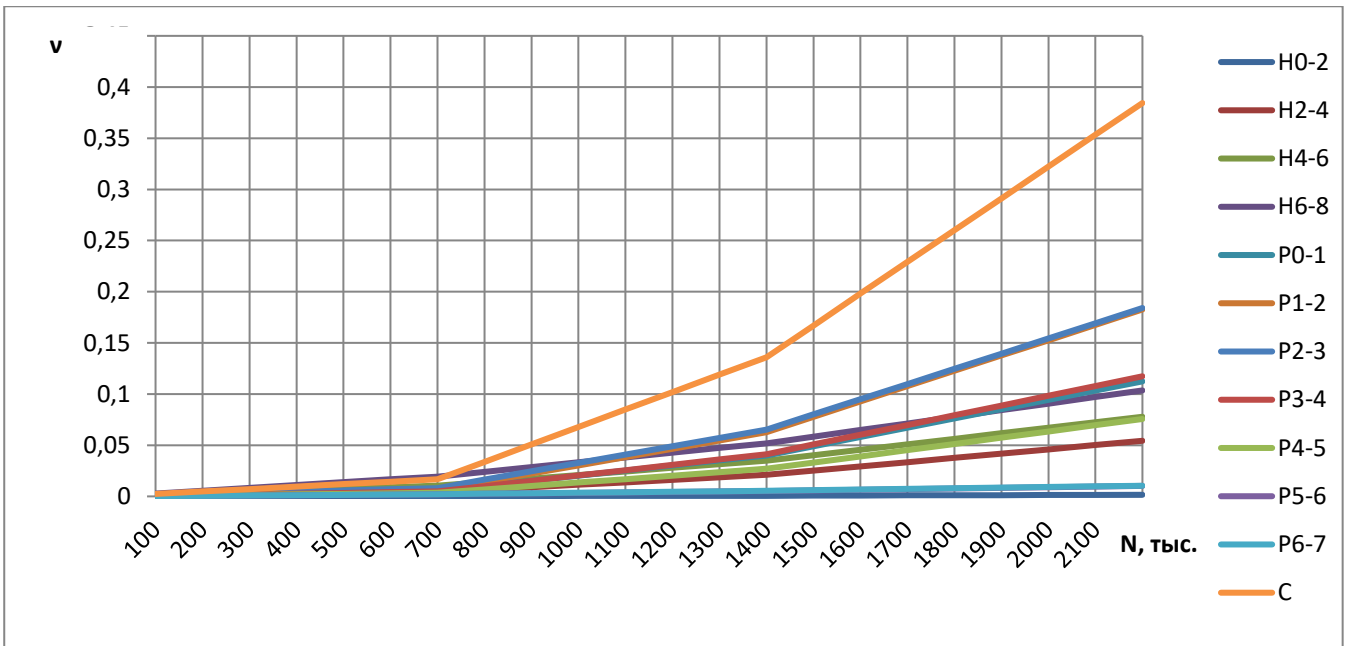


Рисунок 7.12 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 77 м

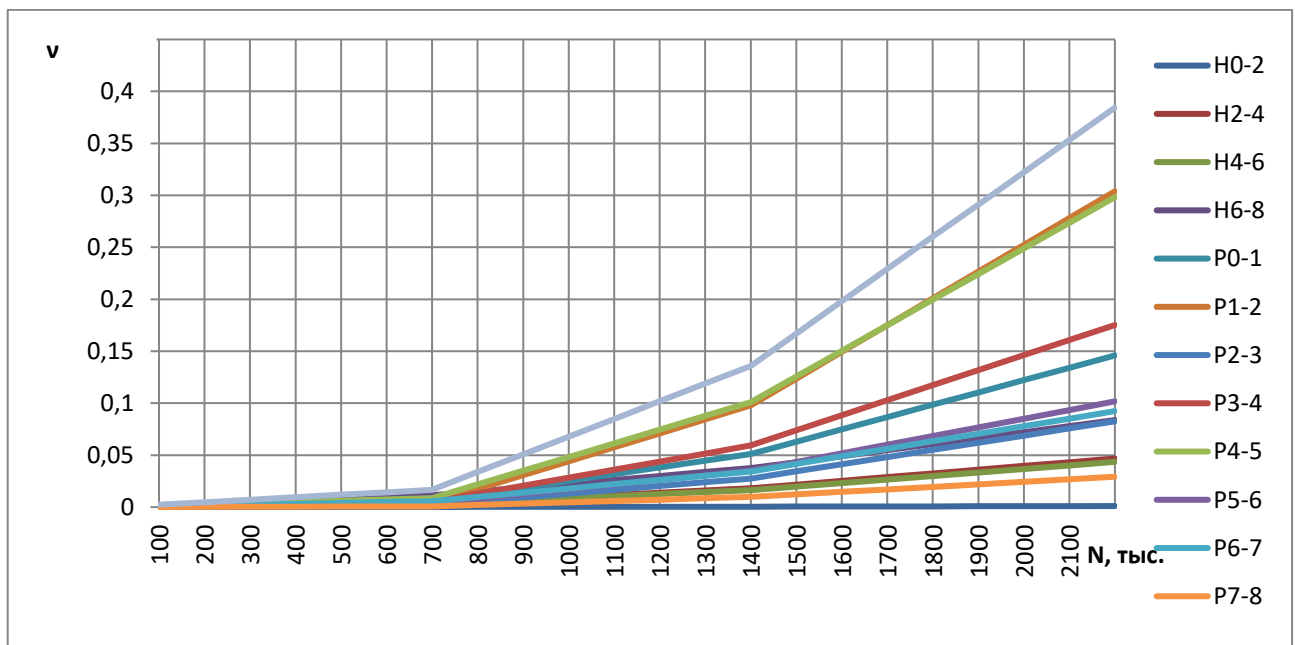


Рисунок 7.13 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 88 м

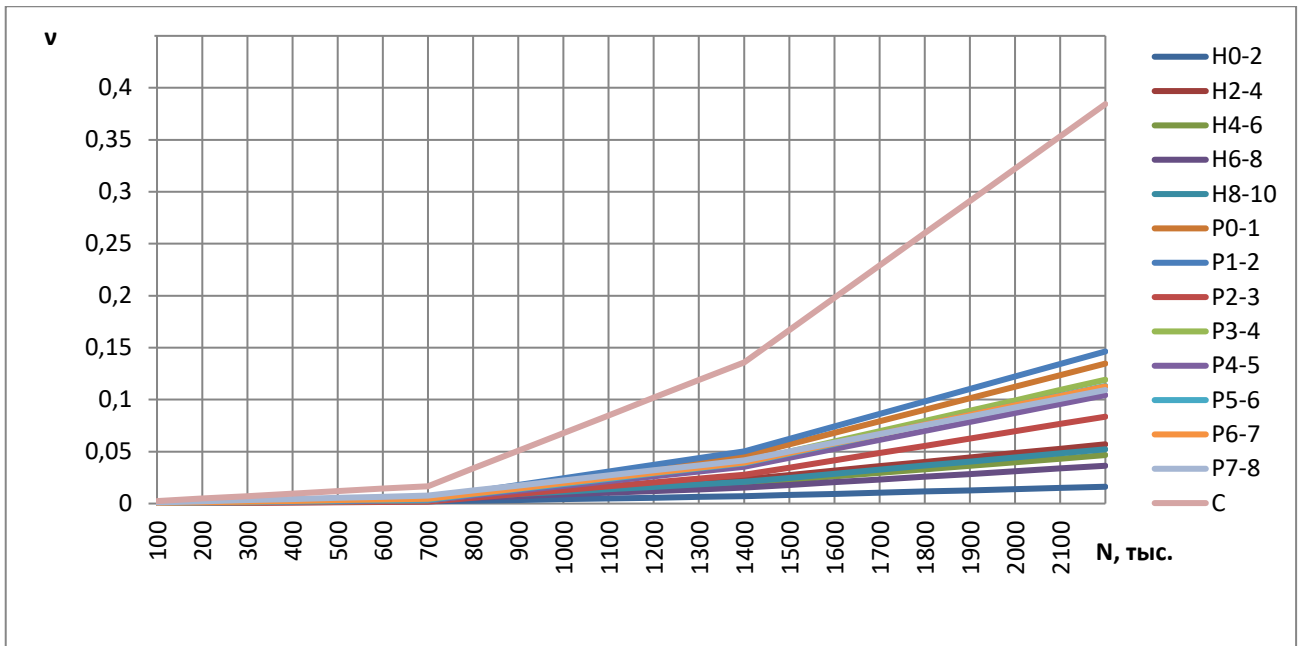


Рисунок 7.14 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 99 м

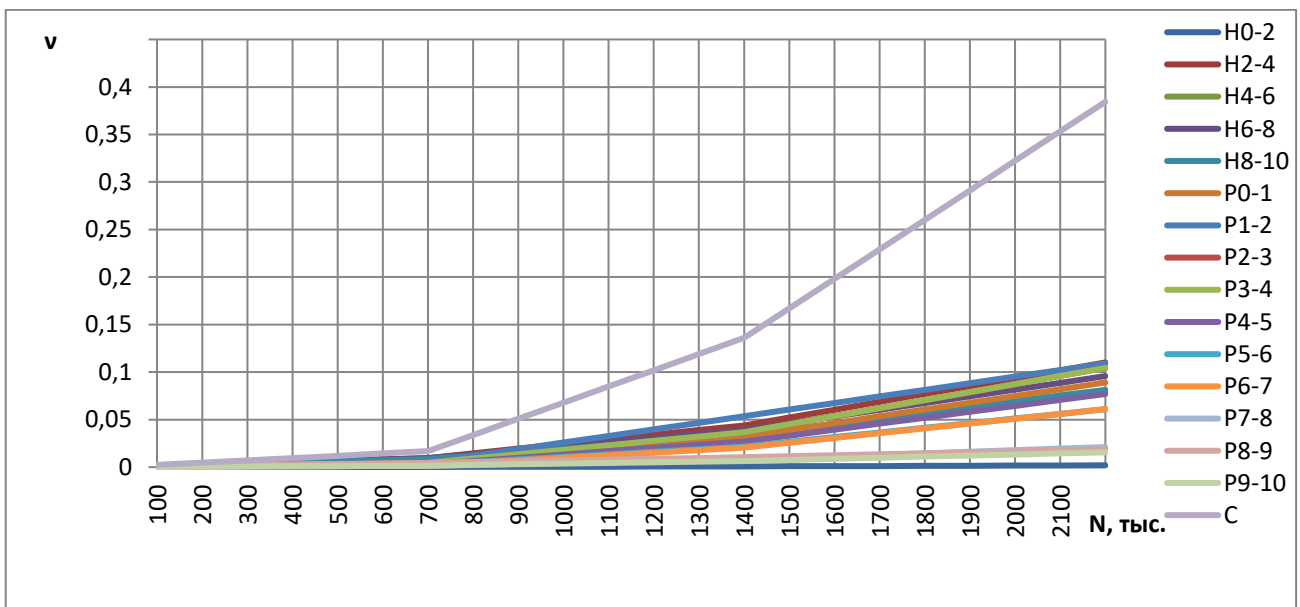


Рисунок 7.15 - Зависимость меры повреждения от нагрузки для ПСК 110 м

Анализ представленных результатов показывает, что накопление усталостных повреждений в разных элементах пролетных строений происходит с разной скоростью, а производная меры повреждений зависит еще и от характера нагрузки, проходящей по элементу. При введении в обращение поездов II и III типов меры повреждений от нагрузок, соответствующим этим поездам, возрастают.

При обозначенном выше варианте эксплуатации, т. е. варианте

эксплуатации железнодорожного моста в течение длительного времени, заключающемся в том, что прошло 700 тыс. поездов I типа, 700 тыс. поездов II типа и далее пошли поезда III типа, построены зависимости вероятности безотказной работы от нагрузки, соответствующей определенному эталонному поезду для разнородных элементов представлены на рисунках 7.16 - 7.23.

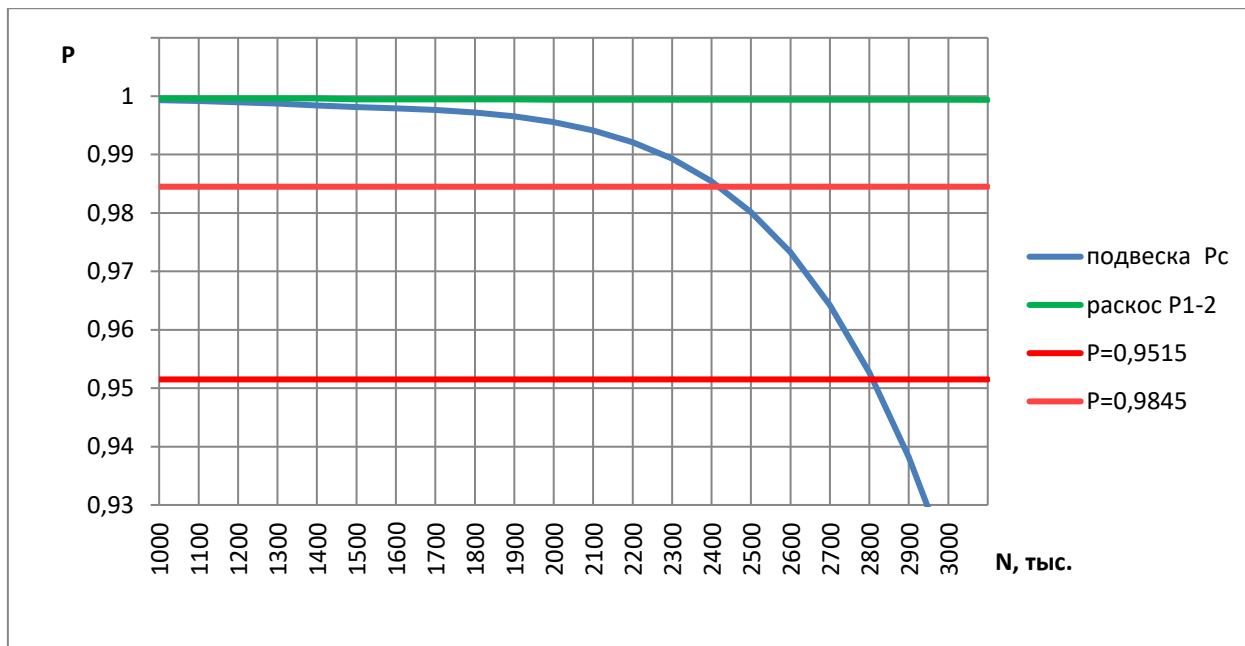


Рисунок 7.16 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 33 м

Анализ представленных результатов показывает, что с введением в обращение поездов II и III типов вероятность отказа увеличивается. Например, для подвесок при N = 500 тыс. тонн вероятность отказа при пропуске нагрузки, соответствующей поезду I типа, равна $P(N) = 0,999779766$, при пропуске N = 700 тыс. тонн вероятность отказа при пропуске нагрузки, соответствующей поезду I типа, равна $P(N) = 0,999760134$, а при N = 2700 тыс. тонн вероятность отказа при пропуске нагрузки, соответствующей поезду III типа, равна $P(N) = 0,96421174$, при N = 2500 тыс. тонн вероятность отказа при пропуске нагрузки, соответствующей поезду III типа, равна $P(N) = 0,98017508$, при N = 2700 тыс. тонн вероятность отказа при пропуске нагрузки,

соответствующей поезду III типа, равна $P(N)=0,96421174$. При введении в обращении поездов III типа срок эксплуатации искусственных сооружений сокращается.

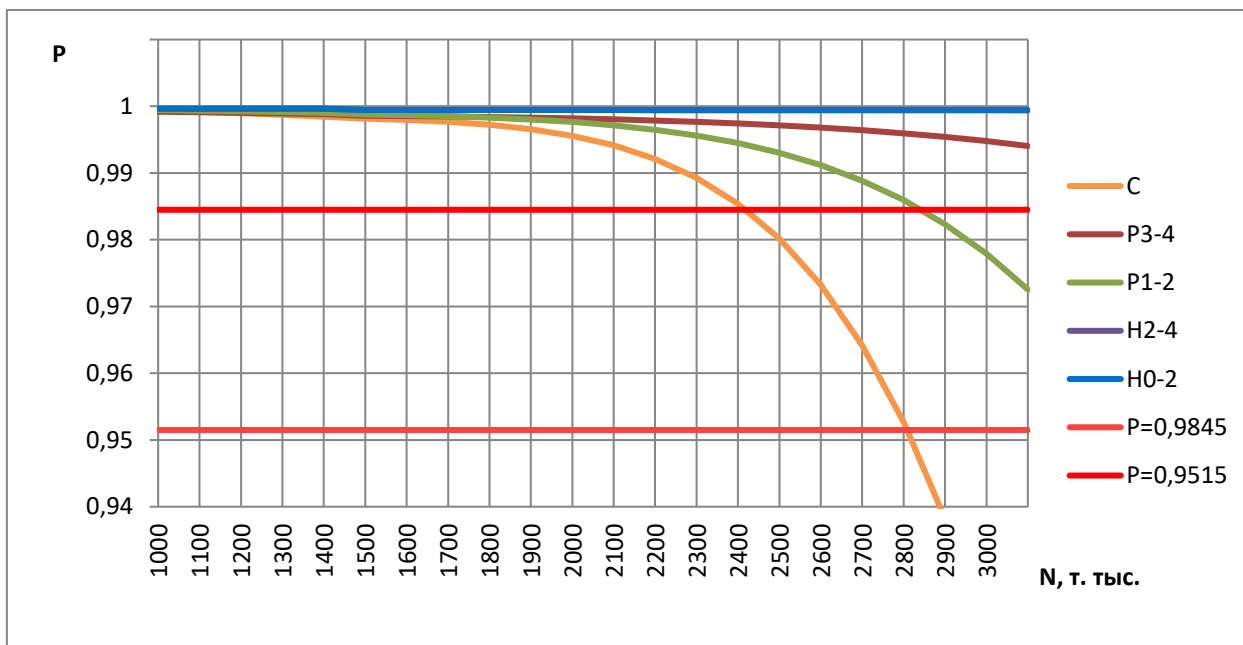


Рисунок 7.17 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки ПСК 44 м

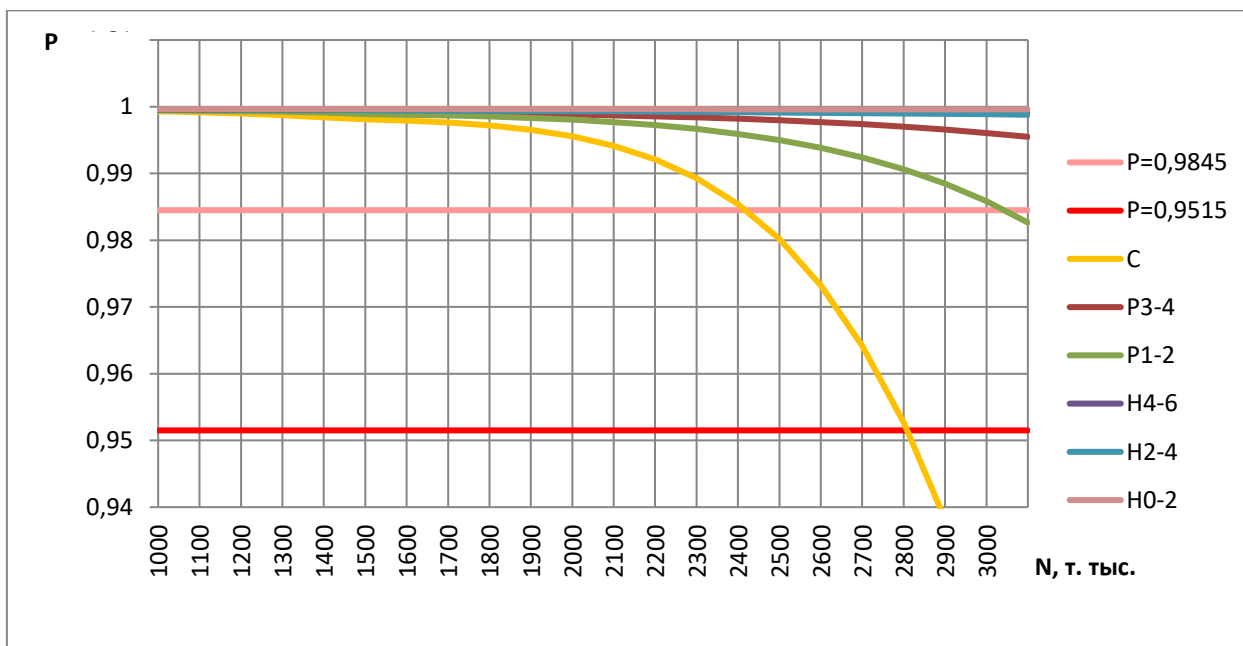


Рисунок 7.18 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 55 м

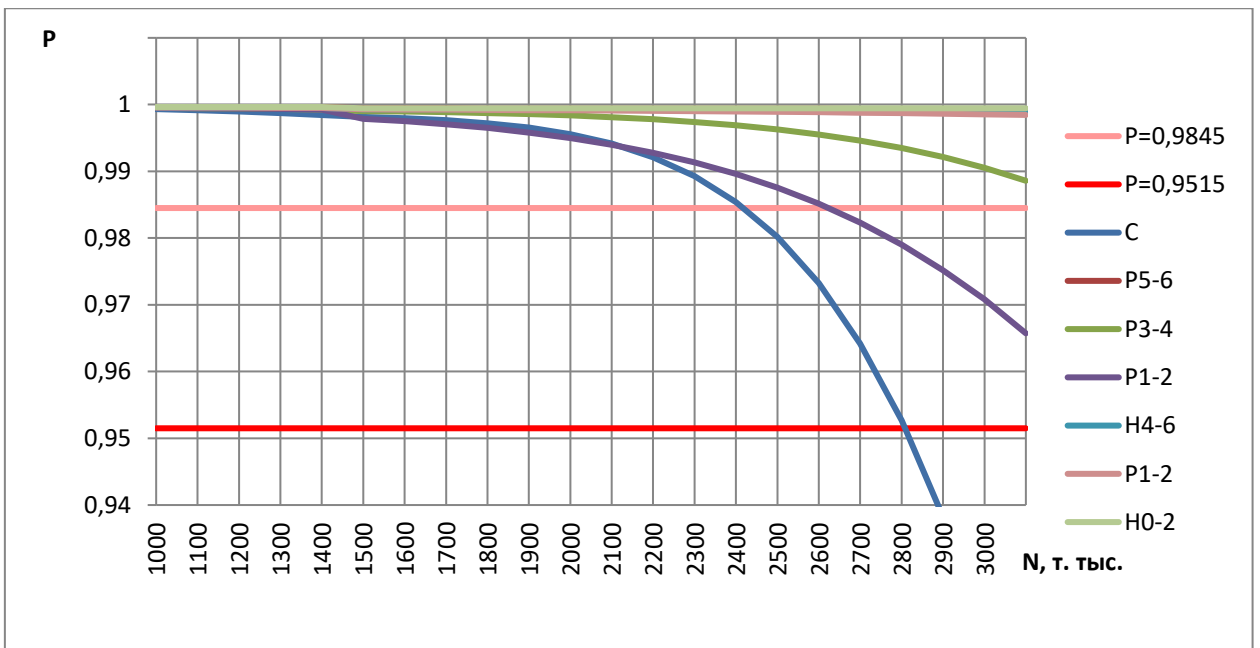


Рисунок 7.19 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 66 м

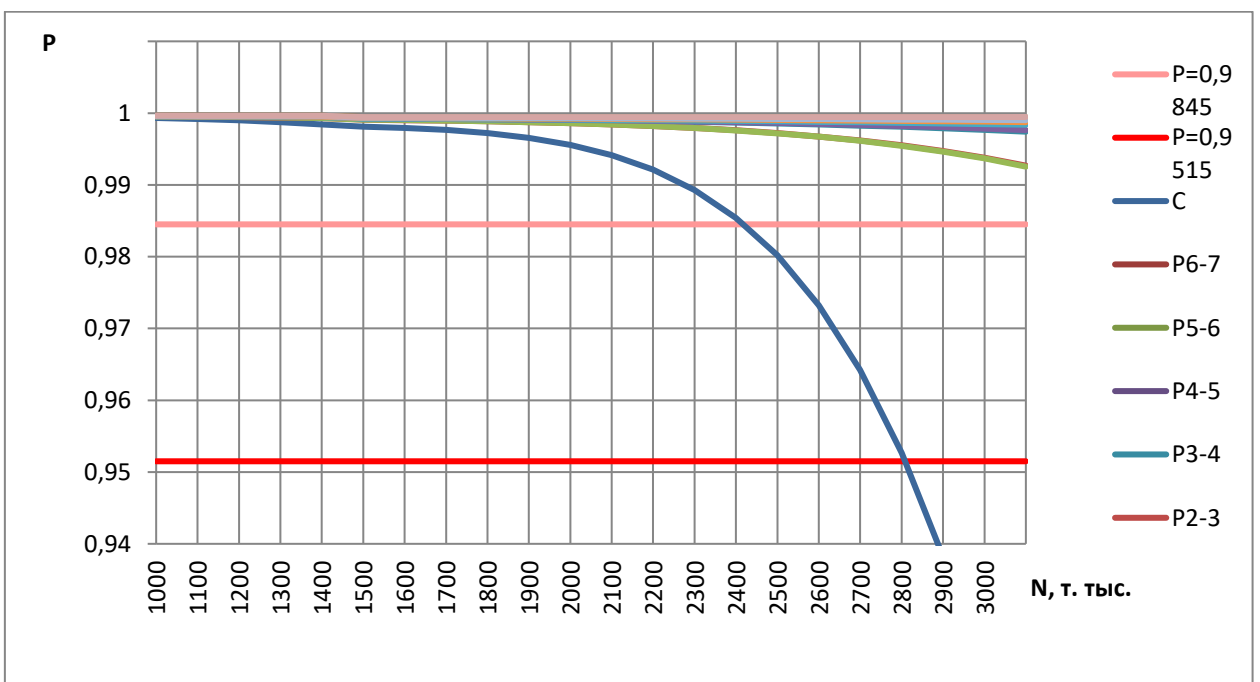


Рисунок 7.20 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 77 м

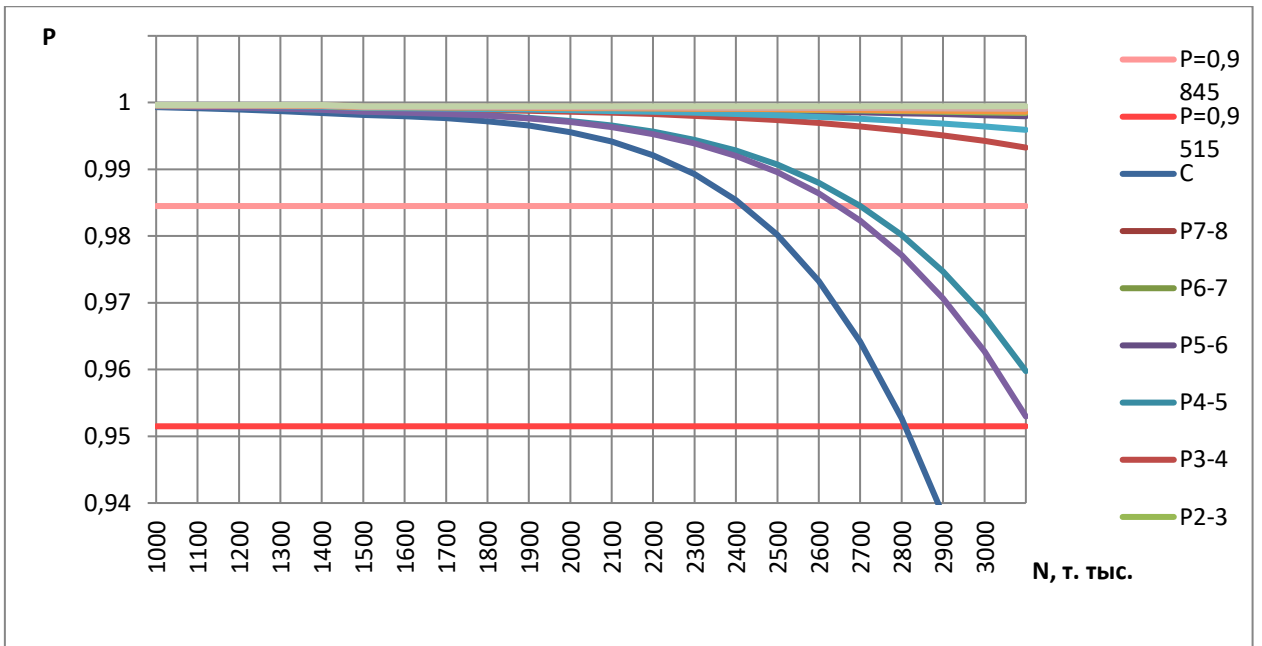


Рисунок 7.21 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 88 м

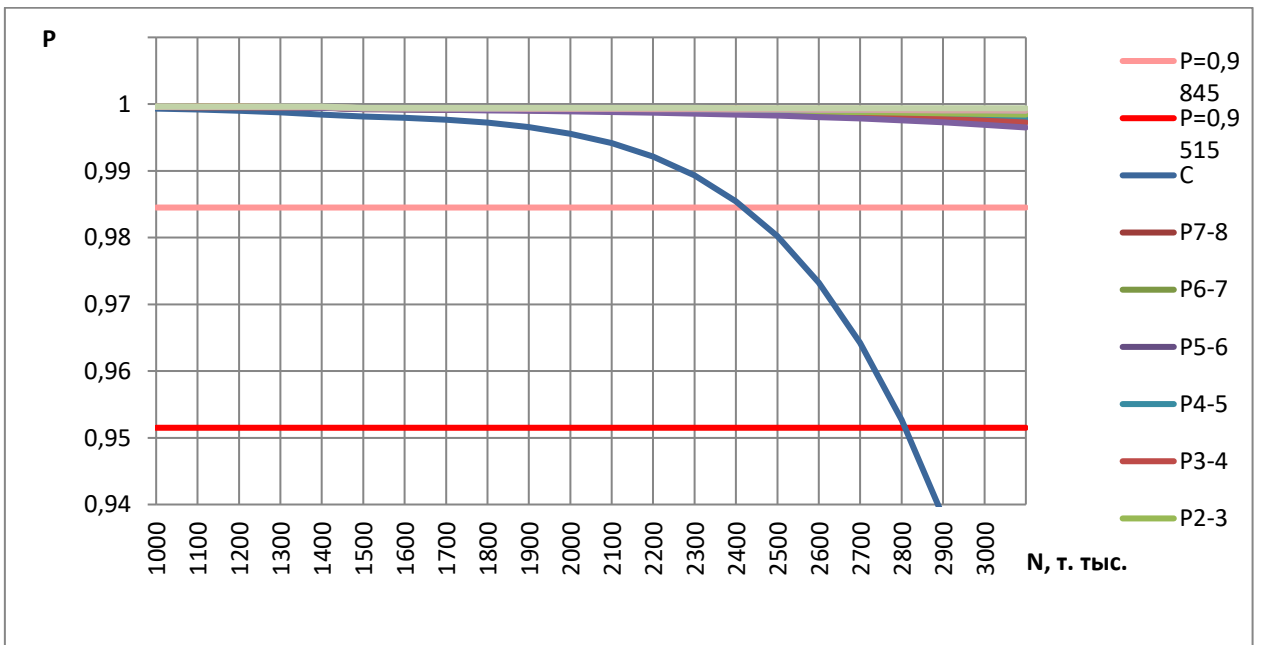


Рисунок 7.22 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки ПСК 99 м

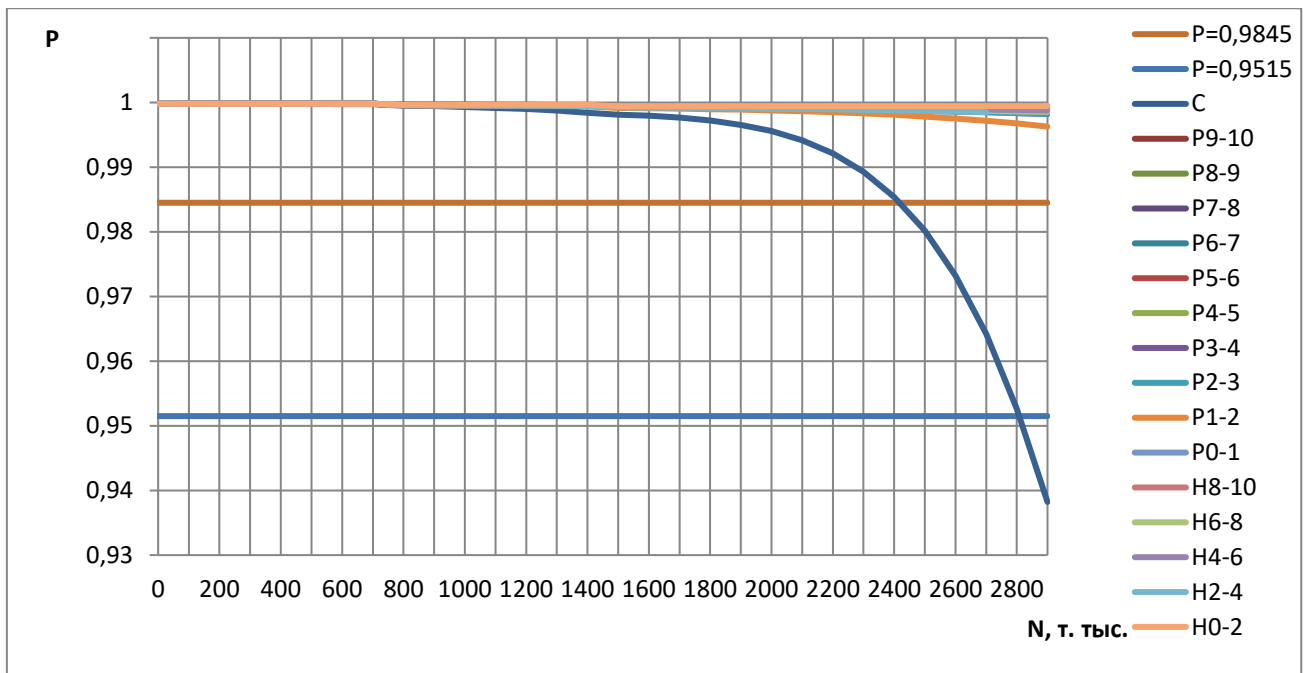


Рисунок 7.23 - Зависимость вероятности безотказной работы от нагрузки для ПСК 110 м

Приведенная выше методика расчета показателей технического состояния: меры повреждения и вероятности безотказной работы в зависимости от нагрузки, соответствующей определенному эталонному поезду, для разнородных элементов, позволяет прогнозировать изменение технического состояния металлических пролетных строений железнодорожных мостов. Представленные расчеты позволяют вычислить время (сроки) замен или ремонтов элементов пролетных строений ПСК с учетом меняющейся нагрузки и их фактического технического состояния. Проведенный на основании этих расчетов анализ позволяет построить стратегию обоснованного управления техническим состоянием искусственных сооружений, в частности железнодорожных мостов, которая обеспечивает максимум надежности их эксплуатации при минимуме затрат на эксплуатацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Задача разработки вероятностных методов, алгоритмов и программных модулей, обеспечивающих управление техническим состоянием эксплуатируемых СТС по их фактическому состоянию, несомненно является актуальной. Стратегия эксплуатации СТС должна использовать вероятностные методы управления их техническим состоянием, что позволит обеспечить максимальный экономический эффект и безопасность эксплуатации одновременно.

2. Оптимальная стратегия эксплуатации СТС, созданная в данной работе, базируется на двух вероятностных методах: рекуррентном методе расчета надежности на основе классификации элементов СТС и методе управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, а также на применении генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.

3. Параметры функции отказов для любого элемента СТС могут быть определены на основании результатов обследований с помощью разработанного метода их расчета.

4. Созданная классификация элементов СТС позволяет моделировать влияние технического состояния этих элементов на техническое состояние всей СТС в целом.

5. Построенный в работе рекуррентный метод расчета надежности на

основе классификации элементов СТС позволяет определить вероятность безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени и срок эксплуатации СТС.

6. Замену или ремонт элемента СТС необходимо производить через оптимальный интервал времени, вычисленный с помощью разработанного метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

7. Применение модифицированного генетического алгоритма позволяет построить схему управления техническим состоянием на весь период эксплуатации элементов СТС и системы в целом, обеспечивающую достижение оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на объект при обеспечении заданного уровня надежности.

8. Созданный программный комплекс «Надежность СТС» состоит из следующих модулей: интерактивный графический препроцессор; модуль расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени; модуль расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС; модуль расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС.

9. Произведена адаптация разработанного программного комплекса для распределенных вычислительных систем высокой производительности и произведены расчеты с их использованием.

10. С помощью разработанного программного комплекса были построены схемы управления техническим состоянием на весь период эксплуатации элементов и системы в целом для эксплуатируемых в настоящее

время СТС. Для моста, расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка, анализ полученных результатов позволяет сделать выводы о том, что срок его эксплуатации может быть продлен при сохранении той же интенсивности движения поездов, а количество выходов на объект сокращено.

11. Созданные в диссертационной работе вероятностные методы, алгоритмы и разработанный программный комплекс могут быть основой управления техническим состоянием СТС и эффективно использоваться во всех организациях, эксплуатирующих СТС, а также в проектно-строительных организациях любой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутковская Д.В., Пилиньский М.Н., Рутковский Л.А. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Телеком, 2006. — 452с.
2. R. Poli, W.B. Langdon, N.F. McPhee, J.R. Koza «A Field Guide to Genetic Programming». - Lulu Enterprises, UK Ltd, March 2008. - 252 p.
3. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы [Текст]: учебно-методическое пособие / Под ред. Тарасевича Ю.Ю. — Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. — 87 с.
4. Гладков Л.А. Курейчик В.В. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под редакцией Курейчика В. М. — 2-ое изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 368 с. — ISBN 978-5-9221-0510-1.
5. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно сложных систем. — СПб.: Политехника, 2000. — 210 с.
6. Барзилович Е.Ю. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т./ Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред) и др.- т.8 Эксплуатация и ремонт / Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича - М.: Машиностроение, 1990. — 320 с.
7. Барзилович Е.Ю. Оптимально управляемые случайные процессы и их приложения. — Егорьевск: ЕАТК ГА, 1996. — 299 с.
8. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (элементы теории).— М.: Транспорт, 1981. — 380 с.
9. Барзилович Е.Ю., Каиштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. — М.: Советское радио, 1971. — 340 с.
10. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Оптимальный интервал предупредительных

замен для искусственных сооружений железных дорог // Мир транспорта. – 2013. – №1. – с.152–155.

11. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Расчет показателей технического состояния искусственных сооружений и их прогнозирование // Транспортное строительство. – 2014. – №1. – с. 30–32.

12. *Кос О.И.* Прогноз износа металлических мостовых пролетов // Мир транспорта. – 2014. – №5. – с.82–89.

13. *Кос О.И.* Рекуррентный алгоритм расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы искусственных сооружений // Транспортное строительство. – 2016. – №6. – с. 16–19.

14. *Кос О.И.* Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений // Мир транспорта. – 2016. – №5. – с.198–204.

15. *Кос О.И., Смирнов В. Ю.* Применение генетического алгоритма в задаче оптимизации замены элементов системы // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022. – № 5. – с. 76–89. (перевод: Kos O. I., Smirnov V. U. Optimal Replacement of System Elements Using a Genetic Algorithm // Journal of Computer and Systems Sciences International. Optimal Control. Volume 61. – 2022. – pp. 793–804).

16. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Математическая модель управления техническим состоянием элементов сложных технических систем на основе закона распределения функции отказов элементов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022, № 6, с. 3–10. (перевод: Kos O. I., Smirnov V. U. Mathematical Model of Control of the Technical Condition of Elements of Complex Technical Systems on the Basis of the Distribution Law of the Function of Element Failures // Journal of Computer and Systems Sciences International. System Theory

and General Control Theory. Volume 61. – 2022. – pp. 885–892).

17. *Kos O.I., Smirnov V.U.* Program module for calculating the optimal interval of preventive substitutions // Proceedings 2017 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). – 2017. – pp. 282–283.

18. *Kos O.I., Smirnov V.U., Eseva E.A.* Adaptation of Reliability Calculation Software Packages for High Performance Distributed Computing Systems // Proceedings 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). – 2018. – pp. 219 – 221.

19. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Вычисление интервала предупредительных замен элементов для обеспечения безопасности искусственных сооружений // Труды XIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 18-19 октября 2012 г., Москва. – М.: ОУС ОАО «РЖД», 2012. – с. XIV–181–XIV–182.

20. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Обеспечение надежности искусственных сооружений на железных дорогах // Сборник к конференции актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность, 02–04 июля 2013 г., Москва. – М.: ФГБУ «НИИ строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», 2013. – с. 463–470.

21. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Расчет показателей технического состояния искусственных сооружений на транспорте // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт–2014», 22–25 апреля 2014 г., Ростов-на-Дону. – Ростов-на-Дону.: РГУПС, 2014. – с. 304–307.

22. *Кос О.И.* Расчет и прогнозирование показателей технического состояния искусственных сооружений // Труды X международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem», 01–31 мая 2014 г., Москва. – М.: МИИТ, 2014. – с. I–52–I–53.

23. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Применение генетического алгоритма искусственного интеллекта для управления эксплуатацией сложных технических систем // Тезисы 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 20–24 ноября 2023 г., Москва. – М.: «Перо». – 148–149 с.

24. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Применение генетического алгоритма для управления эксплуатацией искусственных сооружений на железных дорогах // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа: в 2 ч.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко, 16–17 ноября 2023 г., Гомель. – Г.: БГУ транспорта, 2023. – с. 144–146.

25. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Оптимизация затрат на эксплуатацию сложной технической системы с помощью генетического алгоритма искусственного интеллекта // Современные методы теории краевых задач. Понрягинские чтения – xxxv. Материалы международной Воронежской весенней математической школы, 26–30 апреля 2024 г., Воронеж. – В.: Издательский дом ВГУ, 2024. – 178–180 с.

26. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Применение алгоритма Хебба для классификации качества проведенных ремонтов сложных технических систем // Современные методы теории краевых задач. Понрягинские чтения – xxxv. Материалы международной Воронежской весенней математической школы, 26–30 апреля 2024 г., Воронеж. – В.: Издательский дом ВГУ, 2024. –180–182 с.

27. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. — М.: Стандартинформ, 2011. — 15 с.

28. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 32 с.

29. *Бокарев С. А.* Управление техническим состоянием искусственных сооружений на железных дорогах России на основе новых информационных технологий. — Новосибирск, 2002. — 276 с.

30. *Бокарев С.А.* Методы оценки и системы обеспечения технико-эксплуатационных показателей искусственных сооружений железных дорог России: Дисс. докт. технических наук. — Новосибирск, 2003. — 340 с.

31. *Добромыслов А.Н.* Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. Справочное пособие. — М.: АСВ, 2004. — 72 с.

32. *Евграфов Г.К., Лялин Н.В.* Расчет мостов по предельным состояниям. — М.: Трансжелдориздат, 1962. — 336с.

33. *Балдин В. А., Гольденблат И. И., Коченов В. М., Пильдиш М. Я., Таль К.Э.* Расчет строительных конструкций по предельным состояниям / Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. М. Келдыша. — М.: Строительная литература, 1951. — 272 с.

34. *Александровская Л. Н., Аронов И. З., Елизаров А. И.* Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем: учебник / Под редакцией В. П. Соколова. — М.: Логос, 2001. — 232 с.

35. *Антонов А.В., Никулин М.С.* Статистические модели в теории надежности. — М.: Абрис, 2012. — 390 с.

36. *Александровский С.В.* Расчет бетонных и железобетонных

конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.

37. *Брик А. Л. Давыдов В.Г. Савельев В.Н.* Эксплуатация искусственных сооружений на железных дорогах. – М.: Транспорт, 1990. – 232 с.

38. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

39. *Овчинников А.Г., Межнякова А.В., Гришина И.Н.* Случайный характер деформаций и напряжений железобетонных конструктивных элементов мостов // Вестник ВолгаГАСУ. Сер.: Стр-во. и архит. – 2006. – Вып. 6(21). – 107-113 с.

40. *Устинов В.П., Устинов Б.В.* Вопросы надежности при проектировании строительных конструкций и мостов: Науч. тр. общества железобетонщиков Сибири и Урала / Под ред. В.В. Габрусенко. – Новосибирск: НГАСУ, 2000. Вып. 6. – 80 с.

41. *Барлоу Р., Беляев Ю.К., Богатырев В.А. и др.* Надежность технических систем: справочник / Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. - 606 с.

42. *Руденко Ю.Н.* Надежность систем энергетики и их оборудования / Под общей редакцией Ю.Н. Руденко. В 4-х т. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. - М.: Энергоатомиздат. 1994. - 480 с

43. *Райзер В.Д.* Теория надежности в строительном проектировании: Монография. – М.: Ассоциации строительных вузов, 1998. – 304 стр.

44. *Райнишке К., Ушаков И.А.* Оценка надежности систем с использованием графов, под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1988. – 208с.

45. *Ройтман А.Г.* Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. –

М.: Стройиздат, 1985. – 174 с.

46. *Виноградский Д.Ю., Руденко Ю.Д., Шкуратовский А.А.* Эксплуатация и долговечность мостов. – Киев.: Будивельник, 1985. – 104 с

47. *Чирков В.П.* Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций. Учебное пособие для вузов ж. - д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.

48. *Gnedenko B., Pavlov I.V., Ushakov I.A.* Statistical Reliability Engineering. – New York, 1999. – 499 p.

49. *Иосилевский Л.И.* Практические методы управления надежностью железобетонных мостов / 2-е изд., испр. и доп. – М.: НИЦ «Инженер», 2001. – 295 с.

50. Технические условия на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России (ЦП-622) / МПС России. — М. Транспорт, 1999. – 24 с.

51. *Круглов В.М., Устинов В.П., Бобылев К.Б., Бокарев С.А.* Обеспечение надежности инженерных сооружений // Транспортное строительство. – 2003. – № 1. – с. 13-14.

52. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД» – М., 2006. – 120 с.

53. Инструкция по содержанию искусственных сооружений / МПС России. Транспорт, 1999. – 108 с.

54. *Гнеденко Б.В.* Математические вопросы теории надежности / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 440 с.

55. *Боровков А.А.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1986. - 431 с.

56. *Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.* Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 610 с.
57. *Ткачев О.А.* Использование цепей Маркова для анализа надежности систем со сложной структурой // Кибернетика, № 5 /1983, стр.
58. Основы моделирования сложных систем // Под ред. Кузьмина И.В. — К.: Наукова думка, 1981. – 360 с
59. *Васильев А.И.* Основы надежности транспортных сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ. – 46 с.
60. *Штене Г.* Надежность несущих строительных конструкций / Пер. с немец. — М.: Стройиздат, 1994. – 287 с.
61. *Мехоношин В.С.* Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. Пособие. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 82 с.
62. *Иыуду К.А.* Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 226 с.
63. *Ткачев О.А.* Анализ надежности сетей, состоящих из идентичных элементов // Надежность, No1(48) /2014, с.30–44
64. *Месарович М., Такахара Н.* Общая теория систем: математические основы. - М.: Мир, 1978. - 311 с.
65. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Перев. с англ. — М.: «Мир», Т. I. —1964; Т. II. — 1967.
66. *Смит В.Л.* Теория восстановления. Перев. с англ. — М.: Сов. радио, 1967. — 299 с.
67. *Севастьянов Б.А.* Теория восстановления. // Итоги науки и техн. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет. —1974 . — том 11. — 99–128

68. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
69. *Осипов В.О.* Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1982. – 287 с.
70. *Осипов В.О.* Мосты и тоннели на железных дорогах: Учебник для вузов – М.: Транспорт, 1988. – 367 с.
71. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р
72. *Савчук В.П.* Байесовские методы статистического оценивания: надежность технических объектов / В. П. Савчук. – Москва: Наука, 1989. – 328с
73. Министерство транспорта Российской Федерации. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – 2012. – 325 с.
74. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука. – 1984.
75. Integrated Life-time Engineering of buildings and civil infrastructures // 2-nd international symposium. – Kuopio, Finland, 2003. – 640 p.
76. *Вороновский Г.К.* Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Харьков: Основа, 1997. – 106 с.
77. Справочник по языку с ++ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/3bstk3k5.aspx>
78. *Шилдт Г.С.:* полное руководство, классическое издание: The Complete Reference, 4th Edition. — М.: Вильямс, 2010. — 704 с.
79. *Антонов А.С.* Параллельное программирование с использованием

технологии МРІ: учебное пособие. — М.: издательство московского университета, 2004. — 71 с.

80. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы [Текст] / Актуализованная редакция СНиП 2.05.03-84. — Москва, 2011.

81. *Маликов И.М., Половко А.М., Романов Н.А., Чукреев П.А.* Основы теории и расчёта надёжности. — Л.: Судпромгиз, 1959.

82. *Петропавловский А.А., Богданов Н.Н., Бондарь Н.Г. и др.* Проектирование металлических мостов: учебник/ Под ред. А. А. Петропавловского. — М.: Транспорт, 1982. — 320 с.

83. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надёжности — 2-е изд., перепаб. и доп. — СПб.: БХВ - Петербург. — 2006